MISSION PLANCK : le portrait de l'Univers juste après le Big Bang

POUR LA SCIENCE

Mai 2013 - n° 427

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

La naissance de la créativité

Plus de 100 000 ans avant Lascaux ?

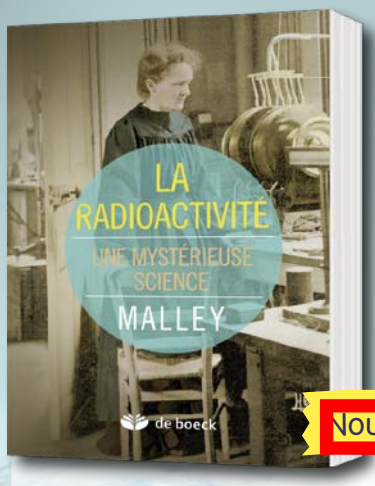
Le cœlacanthe
Rencontre sous-marine avec un cousin proche

Le béton flexible
Résistant aux séismes

Les objets complexes
Courts à programmer, longs à calculer

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

PLAISIRS DES SCIENCES



Nouveauté

LA RADIOACTIVITÉ
Une mystérieuse science
Marjorie C. Malley 256 p. • 22 €

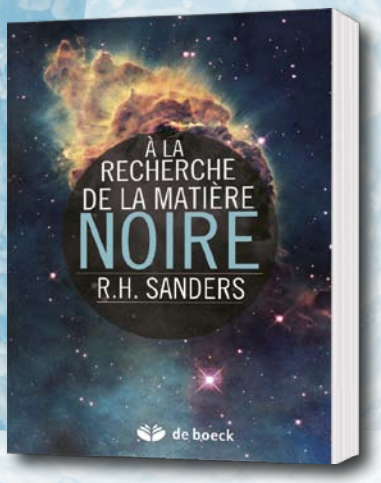
L'histoire étonnante du phénomène appelé radioactivité. Un récit attrayant des divers événements historiques qui ont abouti à la découverte et à l'interprétation de la radioactivité.



Nouveauté

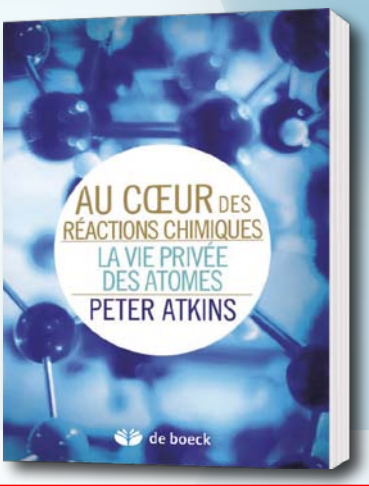
DE L'ÉLECTRON À LA RÉACTION
Entre forme et déformation
Jérôme Joubert 150 p. • 29 € • *Tout en couleurs*

L'esthétique de la chimie quantique dans une approche qualitative des structures et des phénomènes qui régissent tant notre environnement immédiat que l'univers.



À LA RECHERCHE DE LA MATIÈRE NOIRE
Histoire d'une découverte fondamentale
Robert Sanders 230 p. • 22 €

La matière noire permet de trouver une explication à une multitude d'observations astronomiques. Comment et pourquoi cette forme mystérieuse de matière dans l'Univers s'est imposée jusqu'à devenir le paradigme majeur de l'astrophysique.



AU CŒUR DES RÉACTIONS CHIMIQUES
La vie privée des atomes
Peter William Atkins 198 p. • 25 €
Tout en couleurs

Les réactions entre atomes constituent l'essence même de la chimie. Peter Atkins propose au lecteur une expérience inédite : être parmi les atomes, en témoin direct des processus déclenchés.



LA FABULEUSE HISTOIRE DES BÂTISSEURS DE LA CHIMIE MODERNE
Paul Depovere 176 p. • 14 €

Une découverte passionnante de quelques avancées parmi les plus spectaculaires de la chimie dite moderne, ainsi que des circonstances et des acteurs qui ont fait naître cette science.

En librairie et sur **www.deboeck.fr**

de boeck

POUR LA
SCIENCE
www.pourlascience.fr
8, rue Férou - 75278 Paris cedex 06
Standard : 01 55 42 84 00

Groupe POUR LA SCIENCE
Directrice de la rédaction : Françoise Pétry
Pour la Science
Rédacteur en chef : Maurice Mashaal
Rédacteurs : François Savatier, Marie-Neige Cordonnier, Philippe Ribeau-Gésippe, Guillaume Jacquemont, Sean Bailly
Dossiers H.S. Pour la Science
Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin
Cerveau & Psycho
Rédactrice en chef : Françoise Pétry
Rédacteur : Sébastien Bohler
L'Essentiel Cerveau & Psycho H.S.
Rédactrice : Bénédicte Salthun-Lassalle
Directrice artistique : Céline Lapert
Secrétariat de rédaction/Maquette : Annie Tacquenet, Sylvie Sobelman, Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy
Site Internet : Philippe Ribeau-Gésippe
Marketing : Élise Abib assistée de Anaïs Grelet
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 :
Anne-Sylvie André-Mayer, Marcel Berger, Jean-Marie Bourre, François Boussin, Françoise Combes, Timur Delahaye, Elitan Haddok, Hugo Mouquet, Marc-André Mouthon, Christophe Pichon, Anne Pommier, Pierre Salati, Daniel Tacquenet, Richard Taillet, Paul Van Praag
PUBLICITÉ France
Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin (jf.guillotin@pourlascience.fr), assisté de Nada Mellouk-Raja
Tél. : 01 55 42 84 28 ou 01 55 42 84 97 • Fax : 01 43 25 18 29
SERVICE ABONNEMENTS
Ginette Bouffaré. Tél. : 01 55 42 84 04
Espace abonnements :
http://tinyurl.com/abonnements-pourlascience
Adresse e-mail : abonnements@pourlascience.fr
Service des abonnements - 8 rue Férou - 75278 Paris cedex 06
Commande de livres ou de magazines :
0805 655 255 (numéro vert)
DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE
Contact kiosques : À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet
Tel : 04 88 15 12 41
Canada : Edipresse : 945, avenue Beaumont, Montréal, Québec, H3N 1W3 Canada.
Suisse : Servidis : Chemin des châlets, 1979 Chavannes - 2 - Bogis
Belgique : La Caravelle : 303, rue du Pré-aux-oies - 1130 Bruxelles
Autres pays : Éditions Belin : 8, rue Férou - 75278 Paris Cedex 06
SCIENTIFIC AMERICAN Editor in chief : Mariette DiChristina. Editors : Ricky Rusting, Philip Yam, Gary Stix, Davide Castelvecchi, Graham Collins, Mark Fischetti, Steve Mirsky, Michael Moyer, George Musser, Christine Soares, Kate Wong. President : Steven Inchcoombe. Vice President : Frances Newburg.
Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientific American », dans les livres édités par « Pour la Science » doivent être adressées par écrit à « Pour la Science S.A.R.L. », 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

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

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

OJD
PRESSE PAYANTE
Diffusion Certifiée
2012

Associations libres

Les neurosciences nous livrent régulièrement de nouveaux indices sur le fonctionnement du cerveau et sur les mécanismes qui sous-tendent la cognition, les émotions, le traitement des informations sensorielles, mais aussi la prise de décision ou les causes des maladies mentales. Une des découvertes récentes parmi les plus étonnantes est celle de l'activité de repos du cerveau. Même quand nous n'accomplissons aucune tâche cognitive, que nous ne pensons à rien de précis, notre cerveau « travaille ». Qui plus est, cette activité de repos est presque aussi intense que celle du cerveau pensant.

Or l'esprit vagabond, celui qui correspond à l'activité de repos, facilite les approches inédites des problèmes, les associations d'idées. Ces dernières sont dues en partie au fait que les sens ne sont pas indépendants. Ainsi, l'ouïe est influencée par la vue, l'odorat par le toucher, tous les sens pouvant interagir *(voir La fusion des sens, page 60)*. Les associations inédites ou la coloration d'une perception sensorielle par une autre sont sources de créativité.

L'activité du cerveau au repos favorise les associations d'idées et la créativité.

Est-ce parce que le volume de leur cerveau avait augmenté, et que plus un cerveau est volumineux, plus il serait propice aux associations libres, que *Homo sapiens* s'est montré plus créatif que ses ancêtres ? C'est du moins l'hypothèse avancée par certains paléontologues *(voir Les origines de la créativité, page 22)*.

La créativité – c'est une évidence – est un moteur des découvertes et de l'innovation. Le satellite *Planck* en est un exemple. Il a été conçu pour établir avec plus de précision que ses prédécesseurs une carte du fond diffus cosmologique, cette image de l'Univers primordial *(voir Planck, géomètre de l'Univers primordial, page 44)*. Les données transmises confirment le modèle du Big Bang, mais permettent aussi d'étudier la répartition dans l'Univers de la matière ordinaire et de la matière noire, ainsi que la densité de l'énergie sombre. Or certains neuroscientifiques qualifient l'activité cérébrale de repos d'énergie sombre du cerveau, par analogie avec l'énergie sombre dont on ignore la nature, mais qui est indispensable pour expliquer les propriétés de l'Univers. Peut-on imaginer que les résultats de *Planck* feront progresser l'étude du cerveau ? ■

SOMMAIRE

1 ÉDITO

4 BLOC-NOTES
Didier Nordon

Actualités

5 Des anticorps à large spectre pour neutraliser le VIH

7 Un Néandertalien métis

9 Pierre Deligne, prix Abel 2013



10 Manger de la viande augmente-t-il le risque de décès ?

.. et bien d'autres sujets.

Opinions

16 POINT DE VUE
La physique quantique en une minute ? C'est possible !
Joël Chevrier et Julien Bobroff

17 DÉVELOPPEMENT DURABLE
S'aider du vivant pour restaurer les écosystèmes
Thierry Dutoit

21 VRAI OU FAUX
À l'âge adulte, les neurones se renouvellent-ils ?
Alexandra Vevrac



Le numéro comporte deux encarts d'abonnement *Pour la Science* panachés sur la totalité du tirage, une offre d'abonnement spéciale *Pour la Science* p. 24 et une sélection de livres *Pour la Science/Belin/Le Pommier* en p. 76.
4e couverture : © David Palumbo

À LA UNE



PRÉHISTOIRE 22
Les origines de la créativité
Heather Pringle
De nouvelles preuves archéologiques d'ingéniosité indiquent que la créativité artistique et technique est apparue bien plus tôt qu'on ne le pensait.

30 ZOOLOGIE
Dans le monde secret des cœlacanthes
Hugo Dutel, Marc Herbin, Laurent Ballesta et Gaël Clément
Espèce menacée vivant dans les profondeurs marines, le cœlacanthe est un poisson apparenté aux vertébrés terrestres et encore mal connu. Une équipe de plongeurs a réussi à l'observer dans son milieu naturel.



38 SCIENCE ET SOCIÉTÉ
L'étonnant retour de la médecine traditionnelle chinoise
Paul Unschuld
La Chine moderne a voulu remplacer son ancienne tradition thérapeutique par la médecine occidentale. Mais l'intérêt occidental pour la médecine traditionnelle chinoise a entraîné une renaissance de cette dernière.

44 COSMOLOGIE

Planck, géomètre de l'Univers primordial

Alain Riazuelo

Les données du télescope spatial *Planck* sur le fond diffus cosmologique, le rayonnement le plus ancien de l'Univers, confirment les hypothèses principales du modèle du Big Bang avec une précision notablement supérieure à celle des expériences précédentes.

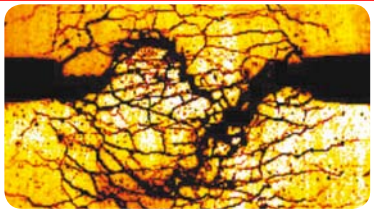


52 MATÉRIAUX ET STRUCTURES

Du béton flexible

Victor Li

Les infrastructures en béton se détériorent vite et sont vulnérables aux tremblements de terre. Pour y remédier, les ingénieurs développent des bétons flexibles.



60 NEUROSCIENCES

La fusion des sens

Lawrence Rosenblum

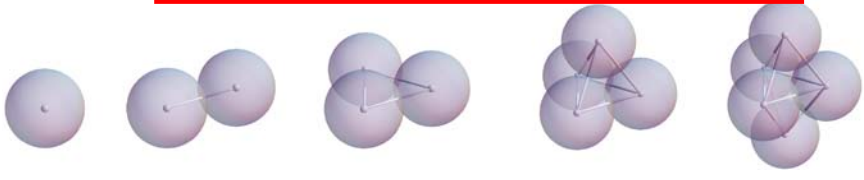
Ce que nous entendons dépend notablement de ce que nous voyons et ressentons. Pourtant, l'intégration de toutes ces perceptions au sein du cerveau livre une version cohérente du monde environnant.

64 MATHÉMATIQUES

Les grappes de sphères collantes

Brian Hayes

Dans un tas de billes, quel est le nombre maximal de contacts que l'on peut former ? On connaît depuis peu la réponse... mais seulement pour moins de 12 billes !



Regards

72 HISTOIRE DES SCIENCES

Guerre des fossiles en Patagonie

Eric Buffetaut

Dans les années 1890, une rivalité scientifique sans merci a été à l'origine des plus grandes collections paléontologiques de l'Argentine.

78 LOGIQUE & CALCUL

Qu'est-ce qu'un objet complexe ?

Jean-Paul Delahaye

La profondeur logique de Bennett, notion proposée il y a 35 ans, nous rapproche d'une compréhension scientifique de l'idée de complexité.

84 SCIENCE & FICTION

Fascinants cousins

J. Sébastien Steyer et Roland Lehoucq

86 ART & SCIENCE

La crucifixion : un supplice énervant !

Loïc Mangin

88 IDÉES DE PHYSIQUE

Des trains flottant au-dessus des rails

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

93 SCIENCE & GASTRONOMIE

Persillé, votre pseudosteak ?

Hervé This

94 À LIRE

Rendez-vous sur

SCIENCE.fr

le site de référence de l'actualité scientifique internationale

Toutes les sciences en un clic

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

Des services exclusifs

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

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

ININIMAGINABLE

À la radio, j'entends le mot « ininicroyable ». Ai-je mal compris ? La personne a-t-elle bafouillé ? Ce terme est-il nouveau ? Qu'importe ! Lue de l'allure, adoptons-le, et décidons de ce qu'il signifie. Formellement, il devrait désigner le contraire de l'incroyable, donc le croyable. Mais fabriquer un synonyme au mot « croyable » n'a aucun intérêt. En fait, le « in » du début donne au mot une emphase telle qu'on a l'impression au contraire qu'il renchérit sur « incroyable » : « ininicroyable » (fortement accentué sur la première syllabe, prononcée *inn*), c'est encore moins croyable que « incroyable » ! On peut dire quelque chose d'incroyable, mais dire quelque chose d'ininicroyable, alors là, non, ce n'est même pas possible.

Le sens des mots naît de leurs sonorités. Cette expérience de pensée le démontre.

COMPRENDRE : UNE ILLUSION

Dans la spéculation comme dans la vie quotidienne, nous sommes entourés de réalités inaccessibles, de l'origine du monde ou de la vie jusqu'à ce qui se passe dans la tête d'autrui. Les théories qui tentent de rendre compte de ces réalités nous offrent un plaisir que les réalités nous refusent : nous pouvons les comprendre. Hélas, le plaisir de comprendre



tend un piège à la pensée. En effet, que nous nous initions à des sciences difficiles, ou que nous nous contentions des pseudo-théories soutenues par les magazines à sensation, notre plaisir à nous expliquer quelque phénomène qui nous intriguait ne garantit pas la pertinence de ce que nous avons compris. On peut comprendre des absurdités ! Les Anciens comprenaient sûrement leurs théories, aujourd'hui invalidées. Et le fait que nous comprenons nos propres théories n'assure pas qu'elles ne connaîtront jamais le même sort.

Ne rien comprendre fait souffrir. Pour éviter cette situation, nous ne sommes que trop disposés à nous persuader que nous avons compris telle ou telle théorie pourtant hasardeuse. Ainsi mise au service de notre plaisir à comprendre, la raison ne peut pas mettre l'irrationnel en déroute, parce que celui-ci peut toujours lui répondre : qui es-tu pour me condamner, toi qui cautionnes tant d'erreurs ?

La recherche du vrai serait diablement facilitée, si le fait de comprendre une théorie était un critère fiable de la validité de celle-ci.

LE LAID, PLUS PERTINENT QUE LE BEAU ?

Parmi les choses, comme parmi les gens, la beauté est rare. Quels que soient nos goûts, ce que nous voyons nous paraît le plus souvent quelconque. La réaction de chacun face à la fréquente laideur des choses et des gens (y compris la sienne) contribue à l'image que l'humanité se fait du monde et d'elle-même : grand sujet de méditation ! La beauté donne à rêver, la laideur donne à penser.

Cependant, la théorie, fascinée par l'idéal de la perfection, élabore des traités du beau et des canons esthétiques plus volontiers qu'elle ne réfléchit à la laideur. La fiction est plus réaliste à sa façon, elle qui n'a pas peur de mettre en scène des monstres, à côté des princes charmants.

La science ne brille pas non plus par son réalisme. Combien de chercheurs vantent la beauté de telle ou telle théorie, et y voient un indice de son adéquation au réel ! Eux aussi, idéalisant le monde, oublient que la beauté y est l'exception. La science aura fait un pas vers le réalisme lorsqu'il sera banal d'entendre un chercheur déclarer : « La théorie que je propose est laide, ce qui est un puissant argument en faveur de sa pertinence. »

L'ART DU REDOUBLEMENT

Cantique des cantiques, vanité des vanités, siècle des siècles, roi des rois... Il y a du mystère dans le redoublement du substantif. Même s'il y a des formules profondes, ou n'est-il qu'un truc rhétorique ? Est-il poétique, ou bien lourd et insistant ? Trancher est impossible, tant ce procédé est ambigu. D'où sa vigueur : il a une puissance à laquelle le livre des livres qu'est la Bible ne pouvait manquer de recourir.



Notre époque n'y manque pas non plus. Des militants lancent l'appel des appels. Des médecins se réunissent en congrès ayant pour objectif de prendre soin du soin. On écrit le roman du roman. Du temps de sa splendeur, le marxisme prétendait être la science de toutes les sciences. Aujourd'hui, Internet s'affirme comme le réseau des réseaux, et le numérique passe pour la culture des cultures. Champion des champions en matière de redoublement du substantif, Edgard Morin a publié *La nature de la nature*, *La vie de la*

vie, *La connaissance de la connaissance*, *L'humanité de l'humanité*.

Comme souvent, les mathématiciens se distinguent par leurs scrupules. Ayant buté sur des difficultés logiques, ils ont renoncé à manier l'ensemble de tous les ensembles. Ils le regrettent encore : pour eux, ça aurait été le fin du fin.

➔ L'AMOUR DES CHIFFRES

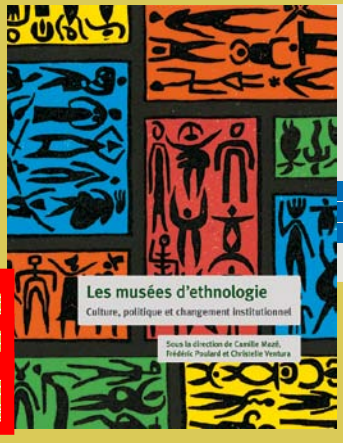
Lorsque vous entrez dans un office du tourisme ou visitez une exposition, l'accueil vous demande souvent non pas dans quel département vous habitez, mais quel est votre code postal. Au lieu de mener à la conclusion « X visiteurs viennent de l'Ain, X viennent de l'Aisne, etc. », cette enquête mènera donc à : « X ont pour code 01000, X ont pour code 02000, etc. ». Les codes ont, sur les départements, un bel avantage : ils se prêtent aux calculs. En divisant la somme des codes par le nombre de visiteurs, on trouve le code postal moyen de ces derniers. Par exemple, 59837,666 – qu'il reste à interpréter, à analyser, et à situer géographiquement. Que personne ne s'avise de dire qu'un tel calcul n'a aucun sens ! Il suffit d'inventer une entité *ad hoc*, le Centre de Gravité Numérique des Visiteurs, et de la désigner par un sigle pour que, aussitôt, le code postal moyen prenne un sens : il mesure le CGNV. On est donc en droit de dresser des tableaux statistiques montrant son évolution au cours des années et – bonheur suprême – de prolonger les courbes pour faire des prévisions. ■



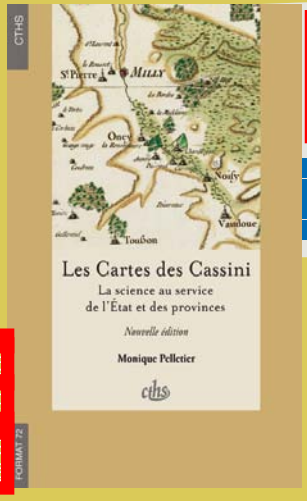
Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques
la plus importante collection d'instruments de travail pour la recherche en sciences humaines



Le lapis-lazuli dans l'Orient ancien
Production et circulation du Néolithique au IIe millénaire av. J.-C.
Michèle Casanova
284 pages
ill. couleur
21 x 27 cm
45 €



Les musées d'ethnologie
Culture, politique et changement institutionnel
Camille Mazé, Frédéric Poulard et Christelle Ventura (dir.)
304 pages
17 x 22 cm
27 €



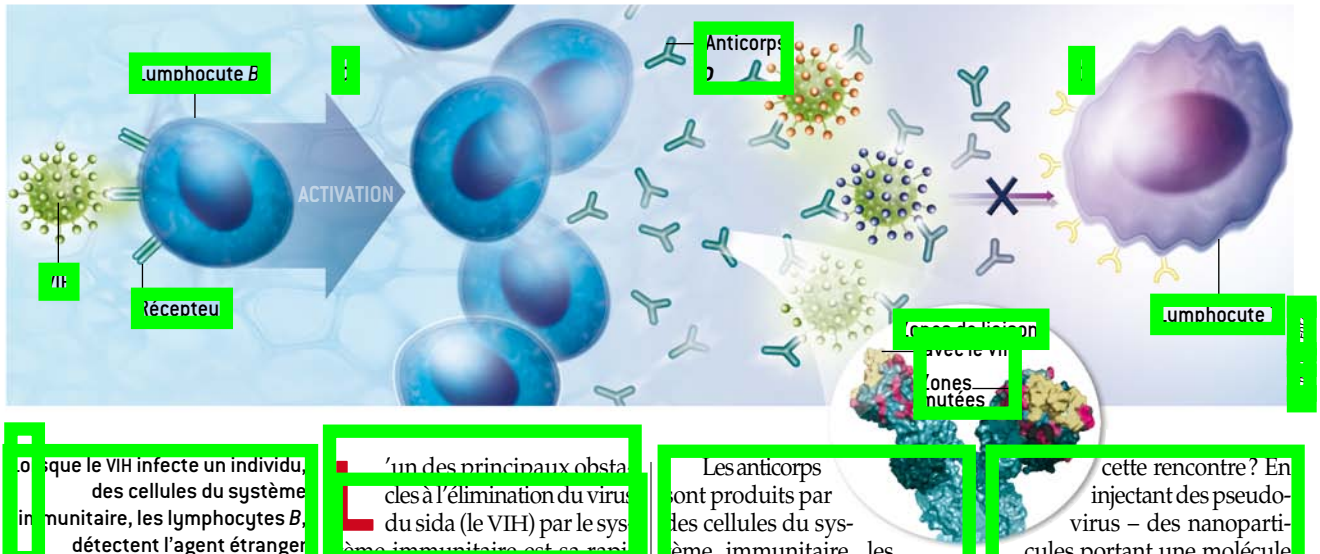
Les cartes des Cassini
La science au service de l'État et des provinces
Nouvelle édition
Monique Pelletier
384 pages
12 x 18,5 cm
ill. noir et blanc
16 €

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

Médecine

Des anticorps à large spectre pour neutraliser le VIH

Des anticorps produits naturellement par certaines personnes contaminées par le virus du sida ouvrent de nouvelles pistes pour l'élaboration d'un vaccin.



Lorsque le VIH infecte un individu, des cellules du système immunitaire, les lymphocytes *B*, détectent l'agent étranger et sont activées *(a)*. Elles prolifèrent et produisent des anticorps contre le virus *(b)*. Parmi ces anticorps, une famille, produite par 5 à 20 pour cent des individus infectés, est particulièrement efficace, car elle empêche de nombreuses formes du VIH d'envahir leurs cibles, les lymphocytes *T (c)*. Ces anticorps, dits neutralisants à large spectre, sont caractérisés par de nombreuses mutations dans une région inattendue *(zoom)*.

L'un des principaux obstacles à l'élimination du virus du sida (le VIH) par le système immunitaire est sa rapidité à muter, ce qui lui permet d'échapper aux défenses naturelles. Toutefois, un espoir renaît aujourd'hui de l'étude d'une famille de molécules, nommées anticorps neutralisants à large spectre, qui reconnaissent et bloquent de nombreuses souches du VIH. Plusieurs équipes ont précisé les caractéristiques de ces anticorps et explorent les pistes vaccinales qu'ils pourraient offrir.

Les premiers de ces anticorps ont été isolés dans les années 1990 chez certains patients infectés par le VIH. Mais ce n'est que récemment, grâce à une meilleure identification des patients produisant ce type d'anticorps (5 à 20 pour cent des personnes séropositives), qu'une nouvelle génération de ces molécules, neutralisant en laboratoire jusqu'à 95 pour cent des formes du VIH testées, a pu être obtenue. Ces anticorps sont d'autant plus prometteurs qu'ils protègent des singes infectés par le virus simien ou des souris «humanisées» infectées par le VIH.

Les anticorps sont produits par des cellules du système immunitaire, les lymphocytes *B*. Chaque cellule porte à sa surface un récepteur spécifique qui, lorsqu'il reconnaît une molécule étrangère, déclenche la production d'anticorps contre cette molécule. Pourquoi seuls quelques patients infectés par le VIH produisent-ils des anticorps à large spectre ? Quelle spécificité rend ces anticorps efficaces contre le VIH ? Comment déclencher leur production ?

C'est à ces questions que les biologistes tentent de répondre. En suivant la coévolution du VIH et de l'un de ces anticorps chez un patient récemment infecté, l'équipe de Barton Haynes, de l'Université Duke aux États-Unis, a montré que ce type d'anticorps ne se développe qu'après mutation du virus. Elle a même identifié le récepteur à l'origine de sa production : ce précurseur a une haute affinité pour le virus initial, mais il ne neutralise pas ses formes mutées. Les lymphocytes *B* qui portent de tels précurseurs doivent donc rencontrer le virus avant sa mutation. Comment faciliter cette rencontre ? En injectant des pseudo-virus – des nanoparticules portant une molécule de l'enveloppe du VIH optimisée pour être reconnue par les précurseurs –, proposent deux autres équipes américaines.

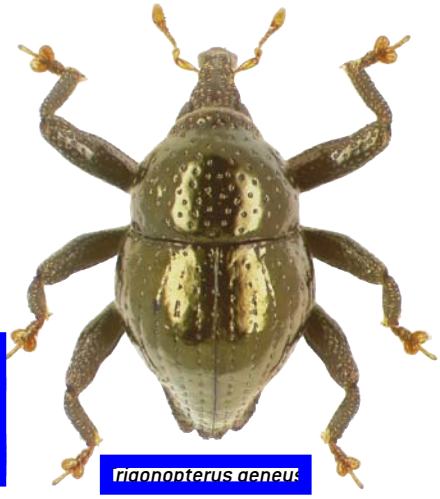
La particularité des anticorps à large spectre est qu'ils subissent 40 à 100 mutations (contre seulement 10 à 15 pour un autre anticorps) avant de pouvoir neutraliser les différents VIH. L'équipe de Michel Nussenzweig, de l'Université Rockefeller aux États-Unis, a montré que ces mutations s'accumulent dans une région moléculaire qui n'intervient pas dans le contact direct avec le virus. En revanche, elles rendent les anticorps plus flexibles, et ainsi capables d'interagir avec de nombreuses souches virales et de les inactiver. Pour aboutir à un vaccin, faudra-t-il guider la mutation de ces anticorps en soumettant les lymphocytes *B* précurseurs aux diverses souches virales par vaccinations successives, ou «suffira-t-il» d'activer ces lymphocytes ?

→ Marie-Neige Cordonnier

H.-X. Liao et al., Nature, Fl. Klein et al., Cell, en ligne les 3 avril et 28 mars 2013

Zoologie

101 charançons papous d'un coup



Trigonopterus geneus

La biodiversité des forêts tropicales est grande, mais très mal connue. Comment étudier avant que les espèces ne disparaissent avec leurs habitats ? Avec des collègues de plusieurs pays, Alexander Riedel, du Muséum de Karlsruhe en Allemagne, a montré qu'on peut donner un coup d'accélérateur aux études taxonomiques.

En environ une année, ces biologistes ont décrit et nommé 101 espèces nouvelles de charançons du genre *Trigonopterus* découverts en Nouvelle-Guinée. Un travail qui, s'il avait été réalisé de façon classique, aurait nécessité beaucoup plus de temps.

Pour accélérer et optimiser les procédures de description et de discrimination des espèces, A. Riedel et ses collègues ont combiné plusieurs approches : des descriptions morphologiques plus courtes et plus concises, des analyses moléculaires (la méthode des « codes-barres à ADN »), des photographies numériques de haute qualité, la mise en ligne des données sur des moteurs *wiki*, ce qui permettra de les enrichir, et la publication dans *ZooKeys*, revue de référence à accès libre.

→ Maurice Mashaal

A. Riedel et al., ZooKeys, vol. 280, pp. 1-150, 2013 ; A. Riedel et al., Frontiers in Zoology, vol. 10, n. 15, 2013

Préhistoire

Un Néandertalien métis

« Qu'ils sont laids avec leurs mentons prognathes ! » pensaient les Néandertaliennes en apercevant les premiers chasseurs *Homo sapiens*. Elles n'imaginaient donc pas qu'elles auraient une descendance avec ces hommes-là… ce qu'une équipe franco-italienne menée par Silvana Condemi, de l'Université d'Aix-Marseille, vient de constater.



Une mandibule néandertalienne présentant un menton vertical, et non fuyant comme ci-dessus, suggère une hybridation avec *Homo sapiens*.

En 1957, dans l'abri de Riparo Mezzena, en Vénétie, une mandibule humaine est retrouvée dans une couche pleine d'outils moustériens, que seuls les Néandertaliens fabriquaient. Or sa symphyse (la pente du menton) est verticale comme chez les hommes anatomiquement modernes et présente une protubérance, ce qui est anormal chez les Néandertaliens, qui n'avaient pas de menton. Pour en avoir le cœur net, les chercheurs se livrent à une comparaison statistique de la conformation en trois dimensions de la mandibule de Mezzena avec celle des mandibules de groupes représentatifs de Néandertaliens et d'hommes modernes. Aucun doute : d'un point de vue statistique, la mandibule de Mezzena est anatomiquement moderne…

La couche moustérienne aurait-elle été contaminée par une mandibule médiévale ? Par chance, les chercheurs ont réussi à extraire de la mandibule du collagène contenant des traces d'ADN mitochondrial. Cet ADN, qui ne se transmet que par la mère, s'avère néandertalien : la mère de l'individu de Mezzena était donc bien néandertalienne !

Qu'en conclure ? Soit que l'individu de Mezzena est issu d'une lignée néandertalienne à menton, soit que le père, ou un ascendant masculin de l'individu de Mezzena, était un *H. sapiens*. Aucun Néandertalien non tardif n'ayant jamais été découvert avec un menton en Europe de l'Ouest, le plus plausible est que l'individu de Mezzena était métis.

→ François Savatier

PLoS One, en ligne le 27 mars 2013

En bref

Des vols plus agités

Vers 2050, les vols transatlantiques seront bien plus agités, à en croire Paul Williams et Manoj Joshi, en Grande-Bretagne. Leurs simulations indiquent que sur l'Atlantique Nord et en hiver, avec le doublement de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone, l'intensité médiane des turbulences en ciel clair (qu'on ne peut détecter à l'avance) augmentera de 10 à 40 pour cent, tandis que la fréquence des turbulences modérées ou plus sévères sera 40 à 170 pour cent plus élevée.

Chasser à la nouvelle lune

Les nuits de pleine lune, où la luminosité est forte, le zooplancton et les poissons nagent loin sous la surface de l'eau pour ne pas être repérés. Des chercheurs de l'Institut Max Planck d'ornithologie de Radolfzell, en Allemagne, ont montré que la mouette à queue d'hirondelle, qui vit sur les îles Galápagos, chasse peu ces nuits-là. En revanche, grâce à une bonne vision nocturne, elle s'active à la recherche de proies pendant les nuits de nouvelle lune, quand le poisson se rapproche de la surface.

Une villa carolingienne

Une villa médiévale a été mise au jour à Aimargues, près de Montpellier, par des fouilles de l'INRAP. Sa particularité est qu'elle n'est pas circonscrite par un rempart, mais installée sur un vaste espace ouvert, qui accueille aussi des cours, des enclos, des jardins et des chemins. Ces éléments, identifiés sur une superficie d'un hectare et demi, sont caractéristiques de l'agriculture encore largement pratiquée sur le mode antique de l'époque carolingienne. Plus tard, l'insécurité aidant, les paysans languedociens du haut Moyen Âge se regrouperont dans des villages fortifiés.

En bref

Gouttes d'eau et de miel

Soumis à la pesanteur, un filet de liquide s'étire, puis forme des gouttes, au bout de dix centimètres pour l'eau... et dix mètres pour le miel. Des instabilités liées à la capillarité, dites de Rayleigh-Plateau, amplifient les petites variations initiales du diamètre du filet et conduisent à son pincement et à la formation de gouttes. Arman Javadi, de l'École normale supérieure à Paris, et ses collègues ont montré que certaines perturbations sont ralenties par la viscosité, d'où le retard de rupture dans le miel.

Un virus de la dengue gonflé

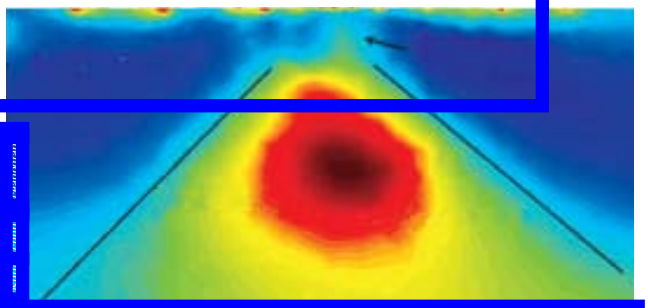
Avec ses collègues, Michael Rossmann, de l'Université Purdue aux États-Unis, a découvert que le virus de la dengue change de conformation entre la température ambiante (régnant chez le moustique qui le véhicule) et celle du corps humain, 37 °C. Par cryomicroscopie électronique, ces chercheurs ont montré qu'à température ambiante, sa surface est lisse, tandis que le virus est bosselé et légèrement plus gros à 37 °C, avec un pouvoir infectieux supérieur. L'élaboration d'un vaccin, très attendu, devra en tenir compte.

Géophysique

L'alimentation de la dorsale est-pacifique

La production de croûte océanique, au niveau d'une dorsale, est une conséquence de la convection au sein du manteau terrestre. Kerry Key, de l'Université de Californie à San Diego, et ses collègues ont montré que dans un cas au moins, c'est l'écartement des plaques tectoniques qui entraîne la remontée de magma.

Les géophysiciens voudraient départager les deux mécanismes de convection mantellique qui ont été proposés. Dans le premier, des flux de roches nommés panaches remontent jusque sous la croûte, où ils se décompriment et fondent partiellement. L'alimentation des dorsales en magma qui en résulte est dite active. Dans le second mécanisme, deux étages de cellules convectives sont superposés, et seules les cellules les moins profondes apportent des roches, qui fondent en partie sous les dorsales parce que l'écartement des plaques océaniques entraîne une décompression : l'alimentation des dorsales qui en résulte est dite passive.



Le profil de résistivité obtenu sous la dorsale est-pacifique, où est visible un « entonnoir » de roches fortement conductrices *(vert et rouge)*.

Par des techniques géophysiques, l'équipe de K. Key a dressé la carte de la résistivité des roches sous un segment de la dorsale est-pacifique. Elle révèle une région triangulaire très conductrice, donc davantage fondue. Puisqu'une alimentation par panache (active) n'est *a priori* pas symétrique, cette région semble résulter d'une alimentation passive. Pour le confirmer, les chercheurs ont simulé numériquement la décompression sous le segment étudié en tenant compte des mouvements des deux plaques qui y divergent. Le résultat reproduit le coin de roches en fusion partielle observé sur la carte de résistivité. Il existe ainsi au moins un cas clair d'alimentation passive d'une dorsale.

→ F. S.

Nature, en ligne le 27 mars 2013

Astrophysique

L'origine des bras multiples dans les galaxies spirales

La Voie lactée, comme 70 pour cent des galaxies qui l'entourent, est une galaxie spirale. Cette structure est répandue, mais comment apparaît-elle et quelle est son évolution ? Est-ce un phénomène transitoire à courte ou longue durée de vie ? Pour le savoir, Elena D'Onghia et ses collègues du Centre d'astrophysique Harvard-Smithsonian ont étudié la formation de galaxies à plus de trois bras, à l'aide d'une simulation numérique où 100 millions de particules représentent la matière de la galaxie.

En introduisant 1 000 particules très massives représentant des nuages géants de gaz, les astrophysiciens ont montré que ceux-ci perturbent le milieu et conduisent à la formation de bras. Ils ont ensuite supposé que ces nuages ne sont pas permanents. Ces concentrations de gaz se forment, puis disparaissent à cause des effets de dispersion du gaz, en particulier lorsqu'elles traversent un bras. Les simulations indiquent que si la durée de vie des nuages dépasse dix millions d'années, il est encore possible de former des bras. En suivant un ensemble de particules, les chercheurs ont montré que les bras sont des ondes de densité : la matière est concentrée lors du passage d'une onde, puis elle revient à sa densité normale une fois l'onde passée.

Plus étonnant, quand les chercheurs suppriment les nuages géants de gaz après la formation des bras, la structure en spirale est conservée, cette dernière créant elle-même les fluctuations de densité, équivalentes aux nuages.

Sean Bailly

E. D'Onghia et al., The Astrophysical Journal, vol. 766, 34, 2013



Simulation d'une galaxie spirale à bras multiples.

© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013

Biophysique

Geckos à l'épreuve de la pluie

Sous ses doigts, le gecko présente 14 000 micropoils par millimètre carré. Ces sétules démultiplient les forces attractives de contact, au point qu'il faut des dizaines de fois le poids du gecko pour l'arracher d'un substrat sec. Et quand il est mouillé ? Avec des collègues, Alyssa Stark de l'Université d'Akron, dans l'Ohio, a étudié la situation.

Les chercheurs ont calculé, sur des modèles de pattes de gecko, les énergies d'adhérence de leur surface à une variété de substrats mouillés. La comparaison avec des mesures réalisées sur six animaux montre que les modèles où les interstices entre sétules restent pleins d'air ou d'eau pendant le contact sur substrat mouillé reproduisent mieux la réalité ; plus le substrat est hydrophobe, moins la diminution de l'adhérence est forte (de 20 à 70 pour cent). Sur une surface de téflon mouillée, l'adhérence est même cinq fois supérieure à celle sur du téflon sec !

→ F. S.

PNAS, en ligne le 1er avril 2013



Le gecko tiendrait-il sur cette feuille, si elle était mouillée ?

Physique

L'antiproton vu par ATRAP

L'antimatière est-elle l'image parfaite de la matière dans un miroir qui inverserait les charges électriques et autres ? Les physiciens des particules pensent qu'il pourrait exister une petite asymétrie entre une particule et son antiparticule. L'équipe de l'expérience ATRAP, installée au CERN, a mesuré le moment magnétique de l'antiproton, grandeur qui caractérise son comportement magnétique et qui est associée à son moment cinétique intrinsèque. Une différence entre les moments magnétiques du proton et de l'antiproton serait une manifestation de l'asymétrie recherchée. Cependant, la mesure est délicate, car l'antiproton s'annihile rapidement avec un proton s'il n'est pas bien isolé et confiné dans un champ magnétique sous un vide extrême. Les chercheurs d'ATRAP ont amélioré la précision de la mesure d'un facteur 680 par rapport à des expériences passées – sans constater la moindre asymétrie.

→ S. B

DiSciacca et al., Physical Review Letters, vol. 110, 130801, 201

Mathématiques

Pierre Deligne, prix Abel 2013

Le 20 mars 2013, l'Académie norvégienne des sciences et des lettres a attribué le prix Abel au mathématicien belge Pierre Deligne « pour ses contributions fondamentales à la géométrie algébrique et pour leur impact continu sur la théorie des nombres, la théorie des représentations et les domaines connexes ».

Ce prix récompense chaque année un mathématicien pour l'ensemble de ses travaux et de ses contributions fondamentales dans le domaine des mathématiques. Il a été créé en 2003 par le gouvernement norvégien à l'occasion du bicentenaire de la naissance du mathématicien norvégien Niels Abel. Il est, avec la médaille Fields (décernée tous les quatre ans), l'une des plus prestigieuses récompenses dans le domaine des mathématiques, de sorte qu'on le considère souvent comme l'équivalent du prix Nobel pour cette discipline.

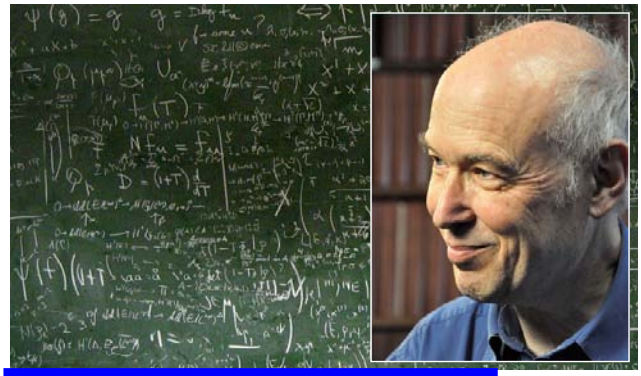
P. Deligne est professeur émérite à l'Institut d'études avancées (*Institute for Advanced Study*) à Princeton, aux États-Unis, où il est arrivé en 1984 après avoir passé 14 ans à l'Institut des hautes études scientifiques (IHÉS), à Bures-sur-Yvette près de Paris.

Tout au long de sa carrière, P. Deligne s'est attaché à établir des liens entre différentes disciplines mathématiques. Il s'agit en particulier de géométrie algébrique, domaine où l'on étudie les courbes, les surfaces et autres objets multidimensionnels – les « variétés » – définis par des équations polynomiales (par exemple, le cercle de rayon 1 dans le plan est défini comme l'ensemble des points de coordonnées (x, y) vérifiant l'équation $x^2 + y^2 = 1$).

L'une de ses contributions les plus marquantes a été la démonstration, en 1973, de la dernière conjecture du mathématicien français André Weil. Cette conjecture portait sur certaines propriétés des « fonctions zêta » liées aux nombres de points solutions d'équations polynomiales considérées sur des corps finis. Un corps fini désigne un ensemble constitué d'un nombre fini d'éléments qui peuvent s'additionner, se soustraire, se multiplier et se diviser. L'exemple le plus simple est le corps noté F_p des entiers modulo p, où p est un nombre premier : $0, 1, 2\ldots, p-1$. On peut ainsi se demander, en fonction de la valeur de p, combien de points dont les coordonnées sont dans le corps F_p se trouvent, par exemple, sur le cercle unité $x^2 + y^2 = 1$. Les conjectures de Weil, devenues théorèmes, aident à répondre à de telles questions.

→ S. B

http://www.abelprize.no



Un tableau rempli par Pierre Deligne lors d'un exposé

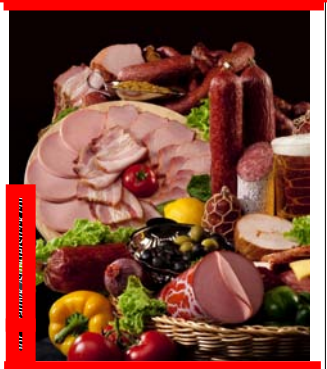
Médecine

Manger de la viande augmente-t-il le risque de décès ?

La viande contient de bons nutriments – des protéines, du fer, du zinc et d'autres oligo-éléments, des vitamines A et B, etc. – qu'il ne faut pas négliger. Pourtant, on conseille souvent de ne pas trop manger de viande. Qu'en est-il réellement ? Une équipe européenne coordonnée par Sabine Rohrmann, de l'Université de Zurich, a étudié pendant 13 ans la mortalité de près de 450 000 personnes mangeant toutes de la viande rouge (bœuf, porc, mouton, agneau, cheval, chèvre), de la viande blanche (volailles et lapin) et de la viande transformée (une viande qui se conserve par fumage, séchage, salage ou ajout de conservateurs, par exemple la charcuterie).

Les chercheurs ont montré que la consommation régulière de plus de 160 grammes par jour de viande transformée augmente le risque de décès de 44 pour cent par rapport à une consommation de 10 grammes par jour. Une consommation de 80 à 160 grammes par jour est associée à un risque accru de 21 pour cent ; de 40 à 80 grammes par jour, le risque est augmenté de 9 pour cent. Il est probable que les matières grasses associées aux viandes transformées et les procédés de conservation (qui introduisent des substances cancérogènes) participent à cette augmentation du risque de décès par cancer et maladies cardiovasculaires.

Pour la consommation de viande rouge, les écarts sont moins significatifs ; dépasser 160 grammes de viande rouge par jour augmente le risque de décès de 14 pour cent, mais une alimentation comportant 20 à 160 grammes de viande rouge par jour n'est pas associée à un risque accru. En France, la consommation moyenne de viande rouge, essentiellement bovine, est d'environ 60 à 80 grammes par jour. Quant à la consommation de viande blanche, elle n'est associée à aucune modification du risque de décès.



L'excès de charcuterie accroît le risque de mourir prématurément

→ Bénédicte Salthun-Lassalle

S. Rohrmann et al., BMC Medicine, en ligne le 7 mars 2013

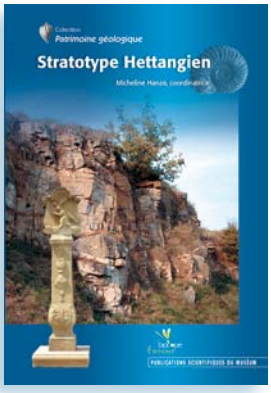
Muséum national d'Histoire naturelle

Le stratotype Hettangien

coordonné par Micheline Hanzo

Le temps du géologue est divisé en étages définis par les fossiles qu'ils contiennent. Afin d'établir des références universelles, certains sites où les couches géologiques correspondant à ces étages affleurent ont été qualifiés de « stratotypes ».
La collection *Patrimoine géologique* a pour objet de publier des synthèses sur chacun des stratotypes situés en France.

Le stratotype de l'Hettangien est donc une référence géologique internationale. Il est de ce fait aussi la célébrité d'Hettange-Grande, localité de Moselle où il a été défini.
Suite à bien des controverses, c'est Eugène Renevier qui, en 1864, en fut l'initiateur, séduit par les travaux de son prédécesseur Olry Terquem, sur des niveaux particulièrement riches en fossiles.
Le stratotype historique méritait d'être protégé ! Il obtint le statut de Réserve naturelle nationale d'Hettange-Grande en 1985. *Bildstock*, pavés, pierres à four, etc., témoignent de l'exploitation du matériau gréseux du site stratotypique.
Bien documenté, richement illustré, cet ouvrage constitue une synthèse des connaissances acquises sur l'Hettangien au niveau de son stratotype, et de la Lorraine belgo-luxembourgeoise, en évoquant plus brièvement d'autres sites du même âge en France.



317 p. • 232 figs • 35,90 € TTC • format 16,5 x 24 cm
ISBN 978-2-85653-688-9

ouvrage en vente à la librairie des Publications Scientifiques face à la Grande Galerie de l'Évolution

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES DU MUSÉUM

Commandes et renseignements
Muséum national d'Histoire naturelle
Publications Scientifiques
Case postale 41 • 57 rue Cuvier • 75231 Paris cedex 05
Tél. : 01 40 79 48 05 • Fax : 01 40 79 38 40
diff.pub@mnhn.fr • http://www.mnhn.fr/pubsc

© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013

Zoologie

La clef des cercles de fées

En Afrique, certaines prairies sont ponctuées de zones circulaires nues, des cercles de fées. Les Himbas, peuple bantou du Nord de la Namibie, y voient les traces de leurs dieux. Norbert Juergens, de l'Université de Hambourg, en Allemagne, avance une explication plus scientifique.

Ces cercles de terre nue, entourés d'une bande d'herbes plus hautes que celles qui parsèment le sol autour, sont façonnés par le termite *Psammotermes allocerus*. L'insecte détruit les plantes et se construit une sorte d'oasis, une dépression qui recueille l'eau, piégée sous la surface par percolation. De la sorte, les termites peuvent supporter l'aridité du désert. Une des conséquences de ces travaux est l'établissement autour de la dépression d'un anneau de plantes touffues, qui profitent elles aussi de l'eau. Ce comportement est dépendant de la pluviométrie, car les cercles de fées suivent une isohyète, c'est-à-dire une ligne le long de laquelle les précipitations sont égales, en l'occurrence 200 millimètres par an. Les termites rejoignent le castor sur la liste des animaux architectes de la nature.

→ Loïc Mangin

N. Juergens, Science, vol. 339, pp. 1618-1621, 2013



Les cercles de fées en Namibie

Neurobiologie

Stimuler la neurogenèse

Quelques zones du cerveau sont le siège d'une neurogenèse adulte : des neurones y sont produits à partir de cellules souches. Cette production ralentit après le traitement d'un cancer du cerveau par radiothérapie ou lors du vieillissement, ce qui est associé à un certain déclin cognitif. Or des chercheurs de l'INSERM et du CEA ont pu la stimuler chez la souris.

Les radiations et le vieillissement modifient l'environnement chimique extracellulaire. Jose Pineda et ses collègues ont constaté qu'une molécule nommée TGF-β était présente en concentration élevée dans les zones de neurogenèse chez les souris âgées ou irradiées. Cette molécule bloquerait la division des cellules souches et déclencherait l'apoptose (l'autodestruction) des cellules nouvellement formées. En administrant des substances qui la neutralisent, les chercheurs ont alors fait augmenter la neurogenèse. Ce pourrait être une piste pour lutter contre le déclin cognitif.

→ Guillaume Jacquemont

J. R. Pineda et al., EMBO Molecular Medicine, en ligne le 25 mars 2013

Physico-chimie

Comment l'eau devient supercritique

Qu'arrive-t-il aux molécules H_2O quand l'eau est chauffée et comprimée au point de devenir « supercritique » ? Autour de Christoph Sahle, de l'Université de Helsinki en Finlande, des physico-chimistes viennent de répondre.

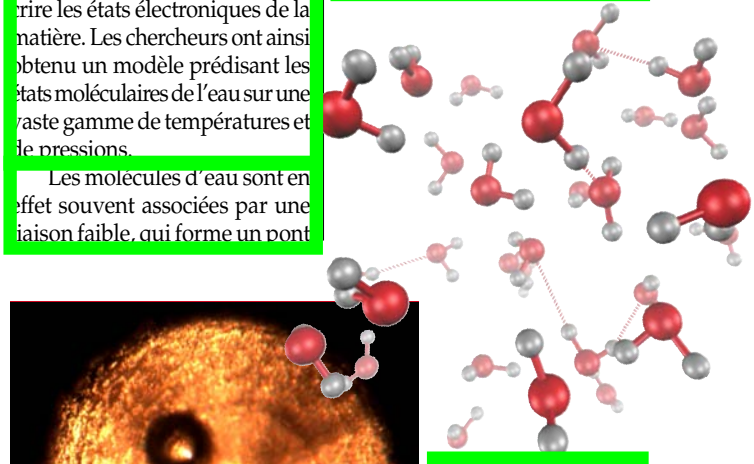
Au-delà d'une température de 374 °C et d'une pression de 22,1 mégapascals, les états gazeux et liquide de l'eau passent dans un état intermédiaire dit supercritique, où l'eau allie une très grande compressibilité à une densité typique d'un liquide. Les chercheurs ont comparé aux prédictions théoriques les spectres de diffusion (dite Raman) des rayons X, obtenus au synchrotron européen ESRF sur des échantillons d'eau placés dans une cellule à enclumes de diamant. Les prédictions étaient fondées sur des simulations numériques utilisant la « théorie de la fonctionnelle de la densité », une méthode utilisée couramment par les chimistes théoriciens pour décrire les états électroniques de la matière. Les chercheurs ont ainsi obtenu un modèle prédisant les états moléculaires de l'eau sur une vaste gamme de températures et de pressions.

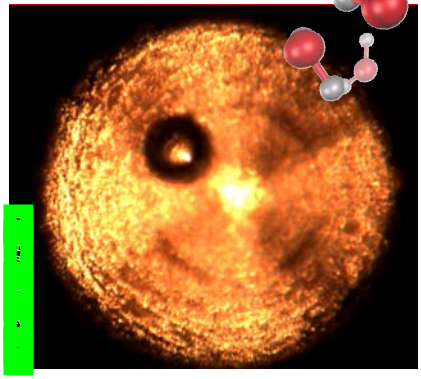
Les molécules d'eau sont en effet souvent associées par une liaison faible, qui forme un pont entre un atome H d'une molécule et un groupe OH d'une autre : la liaison hydrogène. À température ambiante, une telle liaison se fait et se défait environ un milliard de fois par seconde, de telle sorte que chaque molécule d'eau en a quatre en moyenne. En faisant évoluer la pression et la température pour suivre la courbe d'équilibre liquide-vapeur jusqu'au régime supercritique, Ch. Sahle et ses collègues ont constaté que le nombre de liaisons hydrogène, donc de molécules voisines, décroît, pour atteindre moins d'une liaison hydrogène par molécule. À 600 °C et 1 134 mégapascals, par exemple, on ne compte que 0,6 liaison hydrogène par molécule.

Les propriétés chimiques de l'eau supercritique lui faisant jouer un rôle important non seulement dans l'industrie, mais aussi dans la lithosphère et dans la croûte terrestre, l'étudier est… critique.

→ F. S.

PNAS, en ligne le 27 mars 2013





Ci-contre, de l'eau supercritique vue à travers un diamant de la cellule à enclumes de diamant. Ci-dessus, des molécules H_2O avec des liaisons hydrogène (pointillés).

En bref

L'otarie suit le rythme

Une série d'expériences réalisées par Peter Cook et ses collègues, de l'Université de Californie à Santa Cruz, montre que l'otarie de Californie *(Zalophus californianus)* peut être entraînée à bouger la tête en accord avec un signal auditif rythmique, musical par exemple. Une telle performance n'était connue jusqu'ici que chez les humains et certains oiseaux (cacatoès, perruches...) dotés d'une capacité d'imitation vocale. Les otaries, elles, en sont dépourvues et ont un répertoire vocal pauvre.

Mille morts au couvent

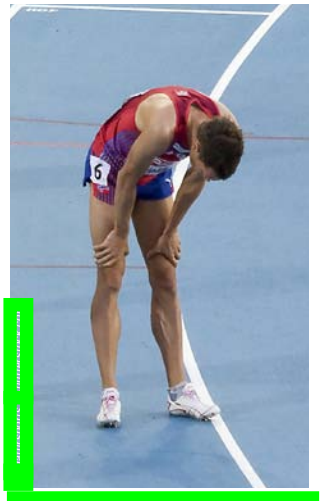
Entre le XV[e] et le XVIII[e] siècles, le couvent des Jacobins à Rennes était un lieu où les fidèles et les moines se faisaient volontiers enterrer, révèlent les archéologues de l'INRAP. Parmi les centaines de sépultures qui y ont été recensées – la plupart sous linceul maintenu par des épingles de bronze ou d'argent –, quelques-unes accueillent des sarcophages de plomb ou sont en caveau. Les pratiques funéraires que l'on y relève (embaumement, orientation…) traduisent le rang social de défunts issus sans doute de l'une des riches familles de la région rennaise.

Neurobiologie

Quand le sport fatigue les neurones

Pourquoi sommes-nous fatigués après une activité sportive ? En collaboration avec les chercheurs de l'Université d'Oxford, Florence Cotel et Jean-François Perrier, de l'Université de Copenhague, ont précisé l'un des multiples mécanismes en cause. Il met en jeu les motoneurones, des neurones qui déclenchent la contraction des muscles : ils émettraient moins d'impulsions électriques après un effort physique en raison d'un excès de sérotonine, un neurotransmetteur massivement libéré lors de l'effort.

La fatigue comprend une composante purement neuronale, qualifiée de fatigue centrale. C'est cette composante qui peut pousser un coureur à s'effondrer alors que ses muscles sont encore en état de se contracter. On soupçonnait un rôle des motoneurones, dont les corps cellulaires sont situés dans le tronc cérébral et dans la moelle épinière, et dont les axones innervent les muscles. Les neurobiologistes ont prélevé de minces tranches dans la moelle épinière d'une



Après un effort intense, les muscles répondent moins bien, en partie parce que la chaîne de transmission de la commande motrice est moins efficace.

fortue, puis ont stimulé les motoneurones qu'elles contenaient par des impulsions électriques, imitant ainsi l'effet d'une activité physique. La concentration de sérotonine a augmenté avec le temps et, au bout d'un moment, la fréquence de décharge des motoneurones (la fréquence à laquelle ils émettent une impulsion électrique) a diminué.

D'ordinaire, l'influx nerveux est déclenché par l'ouverture de canaux ioniques au départ des axones, mais quand elle est trop abondante, la sérotonine inhibe l'ouverture de ces canaux et, partant, l'émission d'impulsions électriques. Ainsi, l'accumulation de sérotonine entraîne une baisse d'efficacité dans l'activation des motoneurones, en partie responsable de la fatigue après un effort.

→ G. J.

F. Cotel et al., PNAS, en ligne le 4 mars 2013

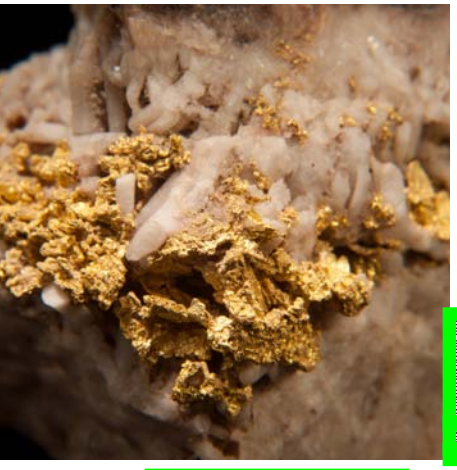
Géosciences

Des gisements d'or « instantanés »

Muruntau, en Ouzbékistan, concentre 6000 tonnes d'or en 10 kilomètres cubes de roche. Comment se forment de tels gisements ? Deux géologues australiens, Dion Weatherley et Richard Henley, apportent une précision au modèle. Les filons d'or orogénique – associés à la formation d'une chaîne de montagnes – sont le fruit d'une lente accumulation de dépôts minéraux charriés par l'eau circulant dans les fissures profondes de la croûte terrestre. Au fil du temps, les variations de pression de l'eau lors des tremblements de terre ont formé des veines de quartz et d'or le long d'importantes failles sismiques.

C'est en tout cas ce que suggèrent les caractéristiques des veines, mais le rôle exact des variations de pression dans la minéralisation des veines reste mystérieux.

Pour le comprendre, les deux géologues se sont intéressés aux fissures latérales le long des failles. Dans certains gisements, tel Muruntau, ces fissures contiennent jusqu'à 80 pour cent de l'or. Lors d'un tremblement de terre, tandis que la faille principale subit un cisaillement, les fissures latérales s'élargissent brusquement. En modélisant cet écartement par la détente d'un piston aux contraintes fixées par des mesures sur un gisement australien,



Filon d'or dans une gangue de quartz et de granite.

les géologues ont montré que l'extrême rapidité de la détente entraîne la vaporisation du fluide contenu dans le piston. Dans les fissures, cette vaporisation ultrarapide (quelques dixièmes de seconde) dépose sur les parois les minéraux du fluide : de la silice et des traces de divers éléments, dont l'or. La couche est mince, mais le phénomène se produit à chaque tremblement de terre. Ainsi, avec un séisme tous les 240 ans, un dépôt de 100 tonnes d'or se formerait en bien moins de 100000 ans, estiment les auteurs…

→ M.-N. C.

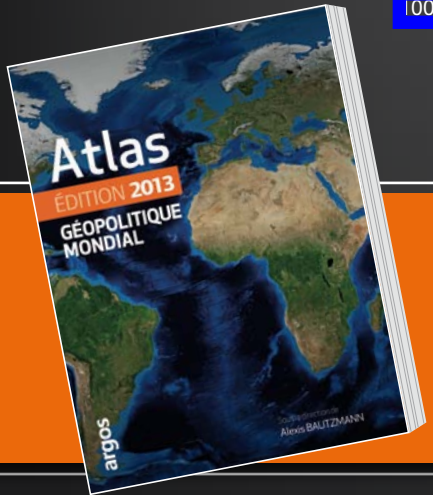
D. Weatherley et R. W. Henley, Nature Geoscience, en ligne le 17 mars 2013

© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013

En vente chez votre marchand de journaux



100 pages • Format 23x30 cm • 8,95 € (codification Presstalis : 05650



Retrouvez DIPLOMATIE sur Internet www.GEOSTRATEGIQUE.com

Et ne manquez pas en librairie

ATLAS GÉOPOLITIQUE MONDIAL 2013

270 cartes et graphiques pour décrypter toute l'actualité internationale

Editions ARGOS/AREION - Diffusion PUF - 23x30 cm - 212 pages - 22,50 €

AREION GROUP • 91 rue Saint-Honoré • 75001 Paris (France) • Tél. +33(0) 175 435 271 • Fax : +33 (0) 811 622 931 • E-mail : diplomatie@areion.f

Zoologie

Double défense pour l'aplysie

Les calmars et les pieuvres échappent aux prédateurs grâce à un jet d'encre. Les aplysies, des gastéropodes marins à corps nu, utilisent le même stratagème, mais en plus élaboré : les substances libérées perturbent les neurones de leurs agresseurs. C'est ce qu'ont mis en évidence Tiffany Love-Chezem, de l'Université d'État de Géorgie, aux États-Unis, et ses collègues.

Les aplysies disposent de deux glandes, l'une fabriquant une encre pourpre, l'autre un produit visqueux nommé opaline. Ces sécrétions, riches en acides aminés, simulent une nourriture qu'un prédateur, telle une langouste, s'empresse d'ingurgiter, laissant l'aplysie s'échapper. Ce n'est pas tout. L'opaline enduit également les antennules (les organes olfactifs) du crustacé et supprime son odorat. Ce serait le premier cas connu d'un système de défense fondé sur l'inactivation des sens du prédateur !

→ L. M.

T. Love-Chezem et al., J. Exp. Biol., vol. 216, pp. 1364-1372, 2013

Médecine

Un médicament antiprion ?

La maladie de Creutzfeldt-Jakob et l'encéphalopathie spongiforme bovine (la maladie de la « vache folle ») sont des pathologies neurodégénératives liées à un repliement anormal d'une protéine, la protéine prion (PrP). Elles sont pour l'heure incurables et fatales. Les travaux de la biologiste française Corinne Ida Lasmézas et ses collègues, à l'Institut de recherche Scripps, en Floride, offrent une lueur d'espoir. Cette équipe a mis au point une méthode de criblage grâce à laquelle elle a identifié une molécule qui réduit la présence des protéines (anormales) PrP à la surface des cellules et prolonge la survie de souris infectées. Il s'agit de l'astémizole, un médicament contre certaines rhinites chroniques. Cette molécule pourrait ainsi, selon les auteurs de l'étude, être utilisée pour le traitement des maladies à prions.

→ M. M

V. E. Karapetyan et al., PNAS, en ligne le 1er avril 2013

Astrophysique

Positrons cosmiques : AMS-02 confirme l'excès

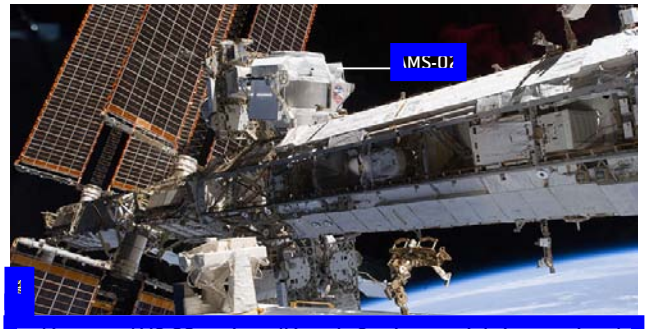
Depuis 2011, l'expérience AMS-02 (*Alpha Magnetic Spectrometer* 2, pour spectromètre magnétique alpha 2), installée sur la Station spatiale internationale, mesure le flux de rayons cosmiques. Les premiers résultats portent sur l'énergie de près de 400 000 positrons – les antiparticules des électrons.

Les positrons sont rares dans la Voie lactée, et sont produits via des processus astrophysiques très particuliers. En étudiant la fraction de positrons (le rapport du flux de positrons et du flux d'électrons et de positrons) en fonction de l'énergie de ces particules, les astrophysiciens avaient observé, dans les données des expériences *Fermi* et PAMELA, que la fraction augmentait pour les positrons de grande énergie. L'équipe d'AMS-02 confirme cette observation en améliorant la précision des mesures.

Quel phénomène explique cet accroissement ? Les deux hypothèses principales sont la production de paires électron-positron près des pulsars – des étoiles à neutrons en rotation rapide sur elles-mêmes –, et l'annihilation de matière noire. Certains spécialistes pensent que ce second scénario est peu probable, car l'annihilation de matière noire devrait créer d'autres signaux qui ne sont pas observés. Par exemple, elle devrait produire un signal particulier en photons que ne décèle pas *Fermi*.

→ S. B.

M. Aguilar et al., Physical Review Letters, vol. 110, 141102, 2013



Le détecteur AMS-02 est installé sur la Station spatiale internationale.

DERNIÈRE minute...

FORMATION IMPROBABLE D'ÉTOILES

Le voisinage du trou noir supermassif au centre de la Voie lactée semblait peu propice à la formation d'étoiles. Des forces de marée importantes étirent les nuages de gaz et les empêchent de s'effondrer et de former des étoiles. L'interféromètre ALMA aurait pourtant détecté des signes d'étoiles en formation à moins de 2×10^{13} kilomètres du trou noir. La compression du gaz pourrait être provoquée par la collision de matière ou par la pression du rayonnement ultraviolet, intense dans cette région.

STIMULER LA MÉMOIRE PAR LE SON

Les ondes cérébrales de basse fréquence sont essentielles à la consolidation des souvenirs lors du sommeil. Or Hong-Viet Ngo, de l'Université de Tübingen, et ses collègues sont parvenus à les stimuler chez des sujets endormis en leur faisant écouter des sons de même fréquence. Ces sons étaient en phase avec les ondes naturelles (les pics et les creux se produisaient en même temps), mesurées par électroencéphalographie. Et au réveil, les sujets se souvenaient mieux d'associations de noms apprises la veille.

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

© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013

FONDATION ÉCOLOGIE D'AVENIR

INSTITUT DE FRANCE

COLLOQUE

" ÉNERGIES RENOUVELABLES ET INTERMITTENCE: Quels défis ? Quelles solutions ? "

Sous la direction de **Pascal Colombani** et **Bernard Salha**



Informations, programme et inscription:
WWW.FONDATIONECOLOGIEDAVENIR.ORG

JEUDI 18 AVRIL 2013
15H-19H

La Maison du Barreau
2 rue de Harlay – 75001 PARIS

ENTRÉE GRATUITE FONDATIONECOLOGIEDAVENIR.ORG
Réservation obligatoire - Places limitées

POINT DE VUE

La physique quantique en une minute ? C'est possible !

Des clips vidéo de quelques minutes, qui vont à l'essentiel sans fioritures ni mises en scène sophistiquées : plusieurs exemples montrent que pour présenter la science moderne à un public assez large, cette méthode a du succès.

Joël CHEVRIER et Julien BOBROFF

MinutePhysics sur le site de vidéos *YouTube* (http://www.youtube.com/minutephysics) est une surprise. Une énorme surprise à nos yeux de physiciens. Ce sont, à ce jour, 79 clips vidéo de science qui durent une à deux minutes pour faire comprendre à un public large – le plus souvent des étudiants – la physique moderne, et pas la plus facile : chat de Schrödinger, boson de Higgs, lumière quantique, $\mathcal{E} = mc^2$...

Ces clips en anglais rencontrent un succès étonnant, alors que, selon l'expression sportive, ils ne lâchent rien... En moins de deux ans, *MinutePhysics* a enregistré 73 millions de vues et un million d'abonnés ! La seule vidéo sur le chat de Schrödinger, un effet au cœur de la mécanique quantique étudié par Serge Haroche, récent prix Nobel de physique, a été visionnée par près de trois millions de personnes.

Certes, on est loin des performances du tube *Gangnam Style* du chanteur sud-coréen Psy, mais cela se compare tout de même à *L'envie* de Johnny Hallyday, alors qu'il s'agit de mécanique quantique, la théorie la plus fondamentale sur laquelle repose notre compréhension de la matière et de la lumière. On peut donc intéresser à ce point-là avec de la physique pure et dure !

Des questions clefs de la physique de notre temps sont ainsi abordées : la masse et le boson de Higgs, la lumière vue par S. Haroche, la mécanique quantique, Usain Bolt et la gravité, la symétrie en physique à travers le football, la flèche du temps, etc. Le discours est sec, va à l'essentiel, sans analogies bancales, et utilise même parfois des équations. Nous-mêmes, enseignants-chercheurs impliqués dans des actions de vulgarisation, nous nous retrouvons pleinement dans ce qui est dit de la physique dans ces vidéos. Il ne s'agit pas de présentations au rabais, au contraire.

PAS D'ANIMATIONS 3D, pas de super-effets *Photoshop*, aucun trucage... Juste une main qui tient un feutre noir, en gros plan, et qui dessine à grande vitesse sur une feuille blanche.

Mais alors, pourquoi un tel succès ? Ce dernier tient probablement au format choisi, là aussi très inattendu. Il n'y a pas d'animations 3D, pas de super-effets *Photoshop*, aucun trucage ni expérience spectaculaire réalisée en direct ; juste une main qui tient un feutre noir, en gros plan, et se met à dessiner à grande vitesse sur une feuille blanche. Un peu de couleur parfois, une voix off presque en accéléré. On n'observe pas vraiment de volonté de se mettre à la portée d'un hypothétique spectateur non scientifique, sinon peut-être par un léger fond musical...

Surtout, avec des clips de une à deux minutes, il n'y a pas assez de temps pour prendre le spectateur par la main : « Qui m'aime me suive ! » Aujourd'hui, ce sont quelques millions de suiveurs. Ce qui semble fonctionner, c'est l'extrême simplicité du support qui contraste avec le sujet lui-même. Une efficacité brute qui n'est pas sans rappeler le bon vieux tableau noir, bien loin des *PowerPoint* qui envahissent les amphithéâtres de nos universités.

Nous réfléchissons nous-mêmes depuis longtemps à la présentation de la science, notamment par l'utilisation de nouveaux outils numériques interactifs qui, à notre sens, la renouvellent en profondeur. Nous n'aurions pas donné cher des chances d'un tel projet. Mais l'Américain Henry Reich, créateur de *MinutePhysics*, l'a réalisé.

Une brève recherche à l'aide de *Google* sur cette personne souligne ses 25 ans et un physique à la Hugh Grant jeune. Il a fait un master de physique fondamentale (bac + 5), puis un second master qui, en France, correspondrait à des études dans une école d'art et de design. Il travaille seul, mais dialogue en permanence avec des chercheurs. L'exercice est d'une grande difficulté. C'est sûrement sa double compétence physique/art qui a permis ce résultat, alliant le fond et la forme dans toutes ses dimensions, jusqu'à l'ambiance sonore et au rythme.

Quoi qu'il en soit, les résultats sont là. Qui plus est, H. Reich avec *MinutePhysics* et, tout dernièrement, *MinuteEarth* consacré aux sciences de la Terre, n'est pas un cas isolé. On peut citer, pour les mathématiques, en lien avec la musique, Victoria Hart (www.youtube.com/user/Vihart), qui se définit comme une « Recreational Mathemusician » (une mathémusicienne de loisir). Toujours la même présentation sur un rythme rapide avec des démonstrations, des schémas, de petits moyens et, par exemple, 1,5 million de visualisations sur la suite de Fibonacci et les plantes. C'est un régal à nos yeux, et *a fortiori* pour des yeux qui ne passent pas leur temps à faire de la science.

V. Hart et H. Reich viennent de rejoindre l'équipe de la *Kahn Academy* (https://www.khanacademy.org/). Il s'agit d'un site d'enseignement en ligne dont la devise est « A free world-class education for anyone anywhere » (une instruction gratuite et de niveau international pour chacun et partout) et qui affiche en ligne plus de 4 000 vidéos, dont certaines sont sous-titrées en français ou en d'autres langues. Elles durent une dizaine de minutes et sont réalisées dans le même esprit graphique, sur tous les sujets académiques.

Avec ses 234 millions de visualisations sur *Youtube* à ce jour, la *Kahn Academy* a dépassé le *MIT OpenCourseWare* (tenu par l'Institut de technologie du Massachusetts), l'une des stars de l'enseignement universitaire numérique avec des milliers de cours en ligne et autour de 50 millions de visiteurs dont nous évidemment).

L'enseignement des sciences doit évoluer et va changer en profondeur. H. Reich, V. Hart ou Salman Kahn ont ouvert la voie. À nous, chercheurs et enseignants, de nous y engouffrer, surtout en France ! Mais pas seuls : c'est en travaillant avec des graphistes, des designers ou même des artistes que nous pourrons, tous ensemble, donner à voir autrement la physique – ainsi que d'autres champs du savoir – et réconcilier le public avec la science d'aujourd'hui. ■

Joël CHEVRIER est professeur de physique à l'Université Joseph-Fourier, à Grenoble.
Julien BOBROFF est professeur de physique à l'Université Paris-Sud, à Orsay.

www.boundscience.fr

DEVELOPPEMENT DURABLE

S'aider du vivant pour restaurer les écosystèmes

Selon les objectifs fixés à la conférence de Nagoya, au Japon, 15 pour cent des écosystèmes dégradés doivent être restaurés d'ici 2020. Pour éviter les pollutions liées aux travaux de génie civil, on développe des techniques fondées sur le vivant.

Thierry DUTOIT

Les écosystèmes rendent de nombreux services à l'homme : production de nourriture, d'énergie et de matériaux ; recyclage des matières organiques ; régulation du cycle de l'eau... En outre, ils assurent un équilibre macro-écologique global, notamment à travers leur influence sur les flux de certains éléments, tel le carbone. Or nombre d'écosystèmes sont déstabilisés par le changement climatique et par les modifications rapides d'usage des terres, liées notamment à l'urbanisation et à l'intensification de l'agriculture. Ils franchissent alors un seuil d'irréversibilité, c'est-à-dire qu'ils deviennent incapables de se régénérer naturellement sur des échelles de temps humaines.

À la fin du XXe siècle, de nombreux biologistes ont signalé que les écosystèmes ne pourront bientôt plus remplir leurs rôles si l'on se contente de mesures de protection : il faut aussi restaurer ceux qui ont été dégradés. En 2010, la conférence mondiale sur la biodiversité de Nagoya, au Japon, a fixé un objectif ambitieux : d'ici 2020, au moins 15 pour cent des écosystèmes dégradés doivent être restaurés.

De nombreux travaux concernent les zones humides (marais, rivières, mangroves, etc.), qui ont une biodiversité riche et une grande valeur économique et sociale. La restauration d'un écosystème passe par plusieurs étapes : un diagnostic aussi précis que possible de l'état de dégradation ; le pilotage des processus biologiques aux différents niveaux d'organisation du vivant (du gène au paysage), afin de reconstituer l'écosystème dit de référence ; enfin, l'évaluation à court et long termes des opérations menées.

On ne connaît jamais parfaitement le fonctionnement d'un écosystème, où interagissent de multiples espèces et facteurs environnementaux, parfois depuis très longtemps. Reconstituer son état passé exact est

donc illusoire. La plupart des opérations engagées se limitent alors à réhabiliter quelques fonctions ou composantes de l'écosystème – par exemple, planter des végétaux sur les pentes de montagnes exposées au vent pour lutter contre l'érosion. Lorsqu'il n'est plus possible de se rapprocher de l'écosystème préexistant, on en crée parfois de nouveaux : c'est le cas quand on aménage un lac en milieu urbain ou industriel.

Les travaux de restauration ont un coût environnemental, car ils font souvent appel à des techniques de génie civil, polluantes et consommatrices de ressources non renouvelables (énergies fossiles), par exemple pour amener de la terre avec des camions. D'où l'intérêt de développer des techniques d'« ingénierie écologique » fondées sur le vivant lui-même, dont on exploite les propriétés (auto-organisation, complexité, adaptabilité…).

Tous les règnes du vivant sont réquisitionnés. Des plantes, dont les racines absorbent certains métaux lourds, peuvent dépolluer les eaux (phyto-épuration) ou les sols (phyto-extraction). L'ancien site minier de Saint-Laurent, dans le Gard, est ainsi dépollué grâce à la plante herbacée *Anthyllis vulneraria*, qui accumule bien le zinc. À résultats égaux, le coût économique et environnemental est bien moindre qu'avec des techniques physico-chimiques. Les plantes servent aussi à construire des berges végétales, stabilisées par leurs racines et qui remplacent les berges artificielles. On réhabilite ainsi des écosystèmes aquatiques variés.

Certains champignons et bactéries fixateurs de minéraux, qui vivent en symbiose avec des plantes, sont parfois utilisés : ils aident ces plantes à recoloniser les sols pauvres. On se sert également d'animaux, telles des abeilles domestiques (qui fécondent les fleurs dans les vergers et les serres quand les pesticides ont éradiqué les pollinisateurs naturels), ou des fourmis, des termites et des vers de terre.

Nous avons ainsi mis à contribution des fourmis pour restaurer la végétation steppique de la plaine de la Crau, dans le département des Bouches-du-Rhône, à la suite d'une grosse fuite d'hydrocarbures en 2009. Les techniques de génie civil classiques (transfert de sols, semis) ont permis de réintroduire des espèces végétales détruites, mais pas de séparer la structure de la végétation. Cette structure était essentiellement dessinée par l'activité de certaines espèces implantées depuis longtemps dans la région, en particulier des fourmis moissonneuses (*Messor barbarus*) : ces fourmis rapportent au nid et consomment des graines de 70 pour cent des espèces végétales présentes. Nombre de ces graines sont abandonnées le long des pistes et dans des dépotoirs à l'entrée des nids, pour des raisons mal connues. Un nid mature abritant jusqu'à 20 000 individus et la densité étant d'un nid tous les 100 mètres carrés, les fourmis effectuent une importante redistribution de graines.

DANS LA PLAINE DE LA CRAU, des fourmis effectuent une importante redistribution de graines et structurent ainsi la végétation

À l'automne 2011, des reines fécondées ont été prélevées après les vols nuptiaux (des millions d'entre elles jonchent alors le sol) et installées dans de petits trous sur le site. Chaque trou était ensuite recouvert d'un galet, qui protégeait la reine de la prédation par les araignées ou les scolopendres et chauffait l'intérieur, en restituant la chaleur solaire accumulée en surface. Un an plus tard, une reine sur deux a produit des ouvrières. On estime cependant qu'il faudra entre cinq et dix ans pour obtenir des résultats significatifs sur la végétation.

Les organismes vivants deviennent ainsi les ingénieurs des écosystèmes. Cependant, leur utilisation peut entraîner des effets secondaires indésirables, telles des invasions biologiques. Elle doit donc être précédée d'études scientifiques évaluant leur impact, pour éviter que le remède soit pire que le mal. ■

Thierry DUTOIT est directeur de recherche à l'Université d'Avignon (UMR CNRS-IRD IMBE) et conseiller scientifique pour l'ingénierie écologique à l'Institut écologie et environnement (INEE) du CNRS.



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

POUR LA SCIENCE

en partenariat avec

naturejobs



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

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

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

POUR LA SCIENCE .fr

Le site de référence de l'actualité scientifique

© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

Offre liberté

19 € par trimestre

- ➜ *Pour la Science* (12 n^{os} par an)
- ➜ *Dossier Pour la Science* (4 n^{os} par an)





+ En cadeau le coffret de deux DVD *Énigmes des planètes*

Six documentaires produits par *National Geographic* pour explorer les splendeurs et phénomènes du Système solaire.

Coffret de deux DVD à paraître le 6 mai – valeur : 19,99€

© Vidéo 2013 Showshank Films. Tous droits réservés.

BULLETIN D'ABONNEMENT

POUR LA SCIENCE

À retourner accompagné de votre règlement dans une enveloppe non affranchie à : Service Abonnements Pour la Science • Libre réponse 90382 • 75281 Paris cedex 06

1 ❑ **Oui, je m'abonne à *Pour la Science* + *Dossier Pour la Science*** au prix de **19 €/trimestre** ou 76 € pour 1 an.
En cadeau, je reçois **le coffret de deux DVD *Énigmes des planètes***. Je bénéficie également des versions numériques de mes magazines sur **www.pourlascience.fr**



698086

Votre cadeau de bienvenue !

2 J'indique mes coordonnées :

Nom : _____ Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal : |_|_|_|_|_| Ville : _____ Pays : _____ Tél. : _____
Pour le suivi client (facultatif)

Je souhaite recevoir la newsletter *Pour la Science* à l'adresse e-mail suivante (à remplir en majuscule) :

|_|_|_|_

À découvrir en kiosque

et sur www.pourlascience.fr



120 pages – prix de vente : 6,95 €

Si nous devons la multitude d'appareils numériques actuels à l'électronique, celle-ci atteint ses limites. Comment les dépasser ? En explorant les propriétés spectaculaires de la matière ! Les candidats au remplacement de l'électronique sont nombreux : oxytronique, spintronique, graphène... Réservant aussi d'autres surprises – capes d'invisibilité, polymères autocicatrisants, etc. –, les études sur la matière n'ont pas fini de nous étonner.

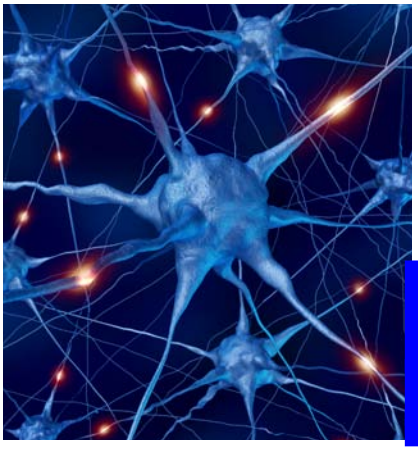
→ **Feuilletez les premières pages sur www.pourlascience.fr**

VRAI OU FAUX

À l'âge adulte, les neurones se renouvellent-ils ?

Oui, ou du moins une petite partie d'entre eux. Quelques aires cérébrales contiennent des cellules souches capables de donner différents types de neurones.

Alexandra Veyrac



Comment pourrions-nous garder des informations en mémoire si nos cellules nerveuses se renouvellent en permanence ? Ce type de questions a longtemps poussé les neurobiologistes à croire que les neurones ne se renouvellent pas à l'âge adulte. Ils étaient notamment confortés dans cette idée par les travaux d'un des pères de la neuroanatomie, l'Espagnol Ramón y Cajal (1852-1934), qui n'avait jamais observé de neurones en cours de division.

Comment le cerveau fait-il pour enregistrer sans cesse de nouvelles informations ? On a longtemps pensé que cette plasticité ne provenait que de la réorganisation continuelle des réseaux neuronaux, *via* l'établissement de nouvelles connexions, et pas de la formation de nouveaux neurones.

Pourtant, dans les années 1960, le neurobiologiste américain Joseph Altman a découvert que de nouvelles cellules apparaissent dans différentes zones du cerveau de rats adultes. Quelque 25 ans plus tard, Michael Kaplan, de l'Université de Boston, a confirmé cette découverte et l'a étendue aux primates. Toutefois, les techniques d'analyse n'étaient pas assez performantes pour déterminer précisément la nature et l'évolution des cellules qui se divisent. En outre, l'idée d'une plasticité cérébrale fondée uniquement sur de nouvelles connexions était bien ancrée chez les neurobiologistes. En conséquence, le dogme du non-renouvellement des neurones n'a pas été remis en cause.

La situation a changé en 1992. Brent Reynols et Samuel Weiss, de l'Université de Calgary, au Canada, ont découvert dans le cerveau de souris des cellules souches capables de se diviser et de former différents types cellulaires du cerveau adulte. Ils utilisaient de nouveaux marqueurs (telles des protéines caractéristiques de certains neurones), qui permettaient de distinguer les types de cellules cérébrales observées. Dès lors, l'existence d'une neurogenèse (une genèse de nouveaux neurones) chez le mammifère adulte s'est imposée.

Berceaux de neurones dans le cerveau

On a identifié deux régions principales où naissent de nouveaux neurones, et ce par dizaines de milliers chaque jour : le bulbe olfactif (juste au-dessus des fosses nasales chez l'homme) et l'hippocampe (une aire cérébrale profonde, impliquée dans la mémoire). Des neurones naissent aussi dans d'autres zones, mais on considère souvent qu'ils ont une importance moindre, pour diverses raisons : soit ils sont peu nombreux, soit ils ne se forment qu'après une lésion ou diverses manipulations, soit ils meurent rapidement. Cependant, leur rôle est peut-être sous-estimé.

Peu de temps après leur naissance, environ la moitié des neurones meurent – sans doute ceux qui n'ont pas servi –, tandis que les autres s'intègrent durablement dans les réseaux. La formation de nouveaux neurones, ainsi que la proportion et le type de ceux qui survivent, dépend de divers paramètres. Par exemple, la neurogenèse diminue avec l'âge ou le stress, mais elle est stimulée par l'exercice physique et l'apprentissage.

Le rôle de la neurogenèse adulte est encore mal connu. Les neurones produits pourraient faciliter la discrimination d'informations voisines, notamment olfactives, spatiales ou relatives à l'environnement, ainsi que leur mémorisation à long terme.

L'importance et les modalités de la neurogenèse chez l'homme doivent aussi être précisées : nos connaissances dans ce domaine concernent surtout les animaux, car on manque d'outils d'analyse appropriés à l'homme. L'étude de la neurogenèse nous permet de mieux comprendre la plasticité cérébrale chez l'adulte (fondée non seulement sur l'établissement de nouvelles connexions, mais aussi sur la naissance et la sélection de nouveaux neurones). Fournira-t-elle aussi des pistes pour lutter contre les maladies neurodégénératives et mentales ? L'avenir le dira. ■

Alexandra VEYRAC est chercheur au Centre de neurosciences de l'Université Paris-Sud (CNRS UMR 8195), à Orsay.



Les origines de la CRÉATIVITÉ

Heather Pringle

De nouvelles preuves archéologiques d'ingéniosité indiquent que la créativité artistique et technique est apparue bien plus tôt qu'on ne le pensait

L'ESSENTIEL

- On a longtemps cru que la capacité des humains à innover était apparue il y a environ 40 000 ans.
- Mais ces dernières années, des découvertes archéologiques ont montré que nos ancêtres ont eu des éclairs de génie bien avant cette époque.
- La capacité humaine à innover serait apparue peu à peu sur une centaine de milliers d'années, stimulée par des facteurs biologiques et sociaux.

Achevée au début du XVI[e] siècle, *La Joconde* possède une beauté mystérieuse que l'on ne retrouve sur aucun portrait antérieur. Pour produire cette œuvre, Léonard de Vinci développa une nouvelle technique picturale, le *sfumato*, qui atténue les contours. Sur plusieurs années, il appliquait, vraisemblablement au doigt, de minces couches de vernis translucides sur la peinture. En empilant jusqu'à 30 couches, de Vinci adoucissait les lignes et les gradations de couleurs jusqu'à ce que la composition semble recouverte d'un voile de fumée.

La Joconde est le fruit du travail d'un génie inventif, un chef-d'œuvre au même titre que la musique de Mozart, les bijoux de Fabergé ou les chorégraphies de Martha Graham. Mais ces œuvres ne sont que les manifestations les plus connues d'une caractéristique que l'on associe depuis longtemps au cerveau humain : la capacité de créer quelque chose de nouveau, le talent pour améliorer sans cesse les projets et les techniques, qu'il s'agisse des récentes voitures japonaises à zéro émission ou des derniers engins envoyés dans l'espace.

La façon dont les hommes ont acquis cette capacité infinie de création fait l'objet de nombreux travaux scientifiques. Car l'homme n'a pas toujours produit un tel foisonnement d'inventions. La lignée de l'homme moderne est apparue en Afrique il y a environ six millions d'années, mais durant près de 3,4 millions d'années, ses premiers membres ont laissé peu de témoignages d'innovation. Cela suggère qu'ils se procuraient de la nourriture à la main, ou avec des outils rudimentaires qui ne se sont pas conservés, des bâtons par exemple.

Puis des hominiinés (hominidés non arboricoles) nomades ont fabriqué des outils coupants en taillant des galets avec des pierres. Cet acte témoigne d'une étonnante ingéniosité. Mais nos ancêtres semblent avoir utilisé le même type de hache multifonction (un biface) pendant les 1,6 million d'années suivantes, à quelques légères modifications près.

L'AUTEUR



Heather PRINGLE est journaliste scientifique au Canada. Elle collabore régulièrement au magazine *Archeology*

Quand l'esprit de l'homme a-t-il commencé à bouillonner d'idées artistiques et techniques nouvelles ? Jusqu'à récemment, la plupart des préhistoriens penchaient pour le début du Paléolithique supérieur, il y a 40 000 ans, époque à laquelle *Homo sapiens* produit en Europe des colliers en coquillages, des peintures d'animaux de l'âge de glace sur les parois de grottes, des armes complexes en silex, en bois de renne et en ivoire. Certains paléontologues ont même pensé pendant un temps qu'une mutation génétique aurait été la cause de ce bond apparent de la cognition humaine.

Une literie vieille de 77 000 ans

Depuis, cette théorie de la mutation a été abandonnée. Durant la dernière décennie, les préhistoriens ont découvert des preuves bien plus anciennes d'art et de techniques avancées, suggérant que la capacité de l'homme à inventer de nouvelles idées est apparue beaucoup plus tôt qu'on ne le pensait – avant même l'apparition d'*Homo sapiens* il y a 200 000 ans. Elle aurait ensuite été latente pendant plusieurs millénaires avant d'exploser en Afrique et en Europe. Ainsi, notre capacité à innover n'aurait pas éclaté d'un coup, mais aurait monté en puissance au cours de centaines de milliers d'années, alimentée par un mélange complexe de facteurs biologiques et sociaux.

Quand la pensée humaine a-t-elle commencé à sortir des sentiers battus ? Quels facteurs ont convergé pour attiser notre créativité ? Le scénario qui se dessine est le fruit d'une étroite collaboration d'archéologues, anthropologues, paléontologues spécialisés dans l'étude de la cognition et primatologues. Pour le comprendre, nous suivrons pas à pas leur enquête, fondée sur plusieurs faisceaux d'indices issus de leurs disciplines, à commencer par la preuve que les racines biologiques de notre créativité sont fort anciennes.

Les scientifiques ont longtemps considéré l'utilisation de symboles comme le principal indicateur de la cognition de l'homme moderne, en grande partie parce qu'elle atteste d'une faculté de langage – une spécificité de l'espèce humaine. Ainsi, l'art pariétal du Paléolithique supérieur indique sans équivoque l'existence, à l'époque, d'individus dotés de capacités cognitives comparables aux nôtres. Mais plus récemment, les experts ont recherché des traces d'autres formes de comportement moderne et de ses antécédents dans les vestiges archéologiques – et ont obtenu d'étonnantes réponses.

L'archéologue Lyn Wadley, de l'Université du Witwatersrand à Johannesburg, en Afrique du Sud, a consacré une grande partie de sa carrière à étudier la cognition de nos ancêtres. Ses recherches l'ont conduite, dans les années 1990, à fouiller la grotte de Sibudu, à environ 40 kilomètres au Nord de Durban, en Afrique du Sud. Il y a deux ans, son équipe a découvert à cet endroit une couche constituée d'un étrange matériau végétal fibreux et blanc. Pour L. Wadley, cette pâte claire et brillante ressemblait aux anciennes literies – des joncs et autres végétaux que les hommes, ultérieurement, disposaient sur le sol pour s'asseoir ou dormir. Mais cette couche pouvait aussi avoir été formée par des feuilles emportées par le vent. Pour trancher, une seule solution : emballer la couche entière dans une enveloppe protectrice en plastique et la rapporter au laboratoire pour la dater et étudier sa composition.

L'entreprise s'est révélée payante. En décembre 2011, L. Wadley et ses collègues ont montré qu'il y a 77 000 ans – soit presque 50 000 ans plus tôt que les exemples de cette technique rapportés auparavant –, les occupants de Sibudu se confectionnaient des literies avec les feuilles d'une unique espèce végétale, sélectionnée parmi les nombreuses plantes de la région. Ils semblaient même avoir une connaissance approfondie de la végétation locale : les feuilles choisies provenaient de *Cryptocarya woodii*, un arbre contenant des traces d'insecticides et de larvicides naturels efficaces contre les moustiques vecteurs de maladies mortelles aujourd'hui.

L'esprit créatif des habitants de Sibudu ne s'arrêtait pas là. Ils concevaient probablement des pièges pour capturer de petites antilopes, dont les restes jonchent le site, et fabriquaient des arcs et des flèches pour abattre des proies plus dangereuses, à en juger par la taille, la forme et les traces d'usure de plusieurs pointes de pierre provenant de cette grotte. En outre, les chasseurs de Sibudu élaboraient divers composés chimiques. C'est ce qu'a découvert l'équipe de L. Wadley en analysant des résidus noirs observés sur des pointes de pierre provenant de la grotte. Les résidus

La mode à Blombos

Même il y a 72 000 ans, la mode évoluait. C'est ce qu'ont montré Marian Vanhaeren, de l'Université de Bordeaux, et ses collègues sur le site de Blombos, en Afrique du Sud. En reproduisant expérimentalement les traces d'usure identifiées au microscope sur des ornements en coquillage, ils ont reconstitué l'agencement des perles et ont montré que la manière de les attacher a changé au cours du temps. Les parures des couches plus profondes étaient enfilées en continu, tandis que celles des couches supérieures étaient attachées par paires.



© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013

LE GENIE EN GESTATION

Des exemples précoces d'inventivité technique et artistique indiquent que la créativité de l'homme a discrètement mûri pendant des centaines de milliers d'années avant de s'épanouir il y a environ 90 000 à 60 000 ans en Afrique, et 40 000 ans en Europe. Des facteurs sociaux, dont l'accroissement de la population, ont probablement amplifié les capacités de nos ancêtres à innover, à la fois en augmentant les chances pour qu'un individu du groupe puisse trouver une nouvelle technique et en favorisant les liens entre groupes, ce qui leur permettait d'échanger des idées. Ce parcours chronologique recense les plus anciennes preuves connues d'innovations clés.

Il y a 3,4 millions d'années
Os d'animaux avec traces de boucherie provenant de Dikika, en Éthiopie.

Il y a 2,6 millions d'années
Éclats en pierre taillés provenant de Gona, en Éthiopie.

Il y a 1,76 million d'années
Biface (outil de pierre taillé sur ses deux faces) provenant de Turkana, au Kenya.



Il y a 1 million d'années
Restes d'os et de végétaux brûlés, preuve d'un feu contrôlé, issus de la grotte de Wonderwerk, en Afrique du Sud.

Il y a 164 000 ans
Outils en pierre traités par la chaleur, provenant du site de Pinnacle Point, en Afrique du Sud.



Il y a 500 000 ans
Outils composites – pointes en pierre fixées sur des hampes en bois – provenant du site de Kathu Pan 1, en Afrique du Sud.

Il y a 71 000 ans
Pointes de projectiles provenant du site de Pinnacle Point, en Afrique du Sud.



Il y a 100 000 à 75 000 ans
Ocre (oxyde de fer) gravée de Blombos, en Afrique du Sud.



Il y a 77 000 ans
Literie insecticide provenant de la grotte de Sibudu, en Afrique du Sud.

Il y a 40 000 à 30 000 ans
Aiguilles à coudre provenant de Kostenki, en Russie.



Il y a 43 000 à 42 000 ans
Instruments de musique (flûtes) provenant de la grotte de Geissenklösterle, en Allemagne.



Il y a 41 000 à 37 000 ans
Peintures pariétales d'El Castillo, en Espagne.



Il y a 40 000 à 35 000 ans
Statuette en ivoire de Hohle Fels, en Allemagne.

étaient des traces de colles constituées de multiples ingrédients qui permettaient de fixer les pointes sur des hampes en bois. Les archéologues ont alors entrepris de reproduire expérimentalement ces colles en mélangeant des particules d'ocre de différentes tailles à des gommes végétales et en chauffant ces mélanges sur des feux de bois. Avec succès ! Il y a 70 000 ans, les occupants de Sibudu étaient « des chimistes, alchimistes et pyrotechniciens très compétents », conclut l'équipe de L. Wadley dans son article.

Ailleurs en Afrique du Sud, d'autres chercheurs ont relevé des traces de nombreuses inventions précoces. Les chasseurs-cueilleurs qui habitaient la grotte de Blombos il y a 100 000 à 70 000 ans, par exemple, gravaient des motifs sur de gros morceaux d'ocre. Ils fabriquaient des poinçons en os, peut-être pour façonner des vêtements en peau. Ils se paraient de colliers de perles chatoyantes faites de coquillages et, dans un lieu dédié, réduisaient en poudre de l'ocre rouge et l'emmagasinaient dans les plus anciens récipients connus, faits de coquilles d'ormeaux. Plus loin à l'Ouest, sur le site de Pinnacle Point, des individus travaillaient la pierre il y a 164 000 ans, chauffant une roche locale, la silcrète, sur un feu contrôlé, pour la transformer en un matériau brillant, plus facile à tailler.

En outre, les préhistoriens ont découvert que l'ingéniosité technique n'était pas l'apanage de l'homme moderne : d'autres hominiinés ont eu des éclairs de créativité. Dans le Nord de l'Italie, l'équipe de Paul Mazza, de l'Université de Florence, a montré que les Néandertaliens, apparus en Europe il y a environ 300 000 ans, élaboraient une colle à base de goudron d'écorce de bouleau pour fixer des éclats de pierre sur des manches en bois, fabriquant ainsi des outils emmanchés il y a environ 200 000 ans. De même, en novembre dernier, Jayne Wilkins, de l'Université de Toronto, au Canada, et ses collègues ont montré que les pointes de pierre provenant du site de Kathu Pan 1, en Afrique du Sud, constituaient autrefois les extrémités de lances vieilles de 500 000 ans qui appartenaient sans doute à *Homo heidelbergensis*, le dernier ancêtre commun de l'homme de Neandertal et de *Homo sapiens*. Et dans la grotte de Wonderwerk, toujours en Afrique du Sud, une couche ancienne contenant des cendres de végétaux et des fragments d'os calcinés suggère qu'il y a un million d'années, un homininé encore plus



LES FOUILLES DE LA GROTTE DE SIBUDU, en Afrique du Sud *(ci-dessus)*, ont apporté la preuve que ses occupants fabriquaient des literies *(ci-contre en haut)* à partir de plantes insecticides *(ci-contre en bas)* il y a environ 77 000 ans – soit 50 000 ans plus tôt que les exemples de cette technique rapportés auparavant.

lointain, *Homo erectus*, a appris à allumer des feux pour se réchauffer et se protéger des prédateurs.

Même nos ancêtres les plus éloignés étaient capables d'avoir des idées innovantes. Sur deux sites proches de la rivière Kada Gona en Éthiopie, une équipe dirigée par le paléoanthropologue Sileshi Semaw, de l'Université de l'Indiana, à Bloomington aux États-Unis, a découvert les plus anciens outils en pierre connus – des couperets vieux de 2,6 millions d'années utilisés par *Australopithecus garhi* ou l'un de ses contemporains, sans doute pour détacher la viande des carcasses d'animaux.

Cognition et création

Aussi impressionnants que soient ces premiers éclairs de créativité, l'immense disparité des innovations, tant en quantité qu'en qualité, entre les hommes modernes et nos lointains ancêtres demande une explication. Quelles modifications cérébrales ont entraîné cette césure entre l'homme moderne et ses prédécesseurs ? En étudiant des images tridimensionnelles de boîtes crâniennes d'anciens hominiinés et en examinant le cerveau de nos plus proches parents vivants – les chimpanzés et les bonobos, dont les ancêtres se sont séparés de notre lignée il y a environ six millions d'années –, les paléontologues commencent à apporter quelques bribes de réponses. Leurs données montrent que la substance grise de l'homme a considérablement évolué au cours du temps.

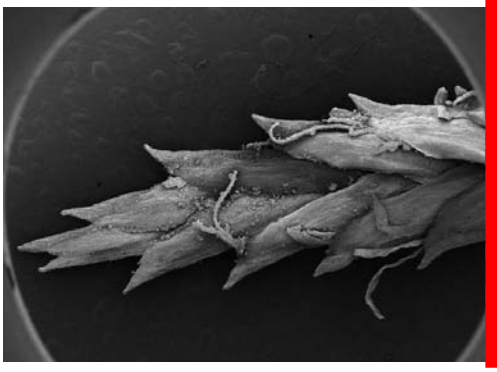
De façon générale, la sélection naturelle a avantagé les humains ayant un cerveau volumineux. Alors que la capacité crânienne moyenne de nos parents australopithèques est estimée à 450 centimètres cubes, à peu près comme chez certains chimpanzés, celle de *Homo erectus* avait plus que doublé il y a 1,6 million d'années, avec 930 centimètres cubes en moyenne. Et il y a 100 000 ans, *H. sapiens* avait une capacité moyenne de 1 330 centimètres cubes. On estime que quelque 100 milliards de neurones traitaient l'information et la transmettaient le long de presque 165 000 kilomètres de fibres nerveuses myélinisées et à travers 10^{14} synapses. Ces évolutions de la capacité crânienne des hominiinés suivent celles des vestiges archéologiques. Pour Dean Falk, paléontologue de l'Université d'État de Floride, il semble bien que la productivité technique ou intellectuelle augmente avec le volume du cerveau.

Ce n'est pas tout. À l'Université de Californie à San Diego, l'anthropologue

© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013







Katerina Semendeferi a étudié le cortex préfrontal, une partie du cerveau qui orchestre la pensée et l'action associées à la réalisation d'objectifs. En examinant cette région chez des hommes modernes ainsi que chez des chimpanzés et des bonobos, son équipe a découvert que plusieurs aires cérébrales clés ont subi une réorganisation importante au cours de l'évolution des hominininés. L'aire 10 de Brodmann, par exemple – impliquée dans la planification et la coordination des entrées sensorielles –, a presque doublé de volume après que les chimpanzés et les bonobos se sont séparés de la lignée humaine. En outre, les espaces horizontaux entre les neurones de cette aire se sont élargis de presque 50 pour cent, offrant plus de place pour établir de nouvelles connexions entre les neurones.

Déterminer comment un cerveau plus gros, réorganisé, a stimulé la créativité n'est pas simple. Mais selon Liane Gabora, psychologue de l'Université de la Colombie-Britannique, au Canada, des études psychologiques d'individus créatifs apportent un indice. Ces individus sont d'excellents rêveurs. Lorsqu'ils sont confrontés à un problème, ils laissent d'abord leur esprit vagabonder, permettant à un souvenir ou à une pensée d'en rappeler spontanément d'autres. Cette association libre favorise des analogies et donne lieu à des pensées inédites. Ensuite, quand ces individus ont une idée de solution, ils se tournent vers un mode de pensée plus analytique. Ils se concentrent sur les propriétés les plus pertinentes et perfectionnent leur idée pour la rendre exploitable.

LE SIMPLE FAIT D'AVOIR PLUS DE NEURONES n'est pas suffisant. Il faut être capable de faire usage de toute cette substance grise supplémentaire.

Selon L. Gabora, plus un cerveau est gros, plus sa capacité d'association libre serait grande. Plus les neurones sont nombreux, plus ils coderaient de stimulus. L'augmentation du nombre de neurones pourrait aussi améliorer le codage d'un épisode, conduisant à un souvenir plus précis et multipliant les voies potentielles pour associer un stimulus à un autre. Imaginons, explique L. Gabora, qu'un homininé effleure un buisson épineux et que des épines pointues déchirent sa chair. Un australopithèque coderait cet épisode simplement – comme une douleur légère et une caractéristique identifiable de ce buisson. Mais *Homo erectus*, dont la population neuronale est plus importante, aurait sans doute codé de nombreux aspects de l'épisode, incluant les pointes aiguisées des épines et sa propre chair déchirée. Supposons alors que cet homininé se mette à chasser. On peut imaginer que son besoin de tuer des proies aurait activé toutes les aires de la mémoire qui codent la chair blessée, et ces pensées lui auraient rappelé sa rencontre avec les épines pointues. Cette association lui aurait inspiré une arme : une lance à l'extrémité très pointue.

Toutefois, la survie des hominininés à gros cerveau dépendait d'une pensée analytique – le mode par défaut. Aussi nos ancêtres ont-ils dû développer une façon de passer « en douceur » d'un mode de pensée à l'autre. Selon L. Gabora, chez *Homo sapiens*, le réglage fin de ce mécanisme – de faibles variations de la concentration des molécules véhiculées d'un neurone à l'autre (des neurotransmetteurs) – s'est fait en plusieurs dizaines de milliers d'années. Alors seulement, *Homo sapiens* a pu tirer un réel avantage créatif de son gros cerveau.

Avec ses étudiants, L Gabora teste à présent ces hypothèses sur un réseau neuronal artificiel. Grâce à un modèle informatique, ils simulent la capacité du cerveau à basculer entre le mode analytique et le mode associatif afin de comprendre comment cette capacité permettrait à quelqu'un de sortir d'une routine cognitive. Une fois cette pièce du puzzle biologique mise en place – il y a peut-être un peu plus de 100 000 ans –, l'esprit de nos ancêtres n'attendait plus que les bonnes circonstances sociales pour développer sa part créative.

En 1987, dans le parc national de Taï en Côte d'Ivoire, deux primatologues de l'Université de Zurich – Christophe et Hedwig Boesche – ont observé un comportement jamais décrit auparavant chez un groupe de chimpanzés recherchant de la nourriture. Près d'un nid de fourmis légionnaires, une femelle chimpanzé s'arrêta et se saisit d'une longue brindille. Elle enfonça une extrémité dans le sol meuble recouvrant l'entrée du nid et attendit l'attaque des fourmis-soldats de la colonie. Quand le bataillon eut progressé d'une dizaine de centimètres le long de la brindille, la femelle chimpanzé la retira du nid, la recourba vers sa bouche et se

Trajectoires régionales vers la modernité

On sait aujourd'hui que des innovations que l'on attribuait à l'arrivée de l'homme de Cro-Magnon en Europe il y a 40 000 ans ont une origine plus ancienne et que bon nombre ont émergé en Afrique il y a 200 000 à 40 000 ans. Ces découvertes contredisent l'hypothèse selon laquelle notre système cognitif serait la conséquence d'une mutation génétique soudaine qui aurait modifié, il y a 50 000 ans, le fonctionnement du cerveau.

Mais sont-elles la preuve que les cultures modernes ont émergé graduellement en Afrique pour la simple raison que notre espèce est originaire de ce continent ? Rien n'est moins sûr. Ailleurs, les Néandertaliens développent de façon autonome certaines de ces innovations. De plus, des innovations que l'on repère en Afrique il y a 75 000 ans – parures en coquillages, techniques de taille de la pierre élaborées… –, disparaissent ensuite pour ne réapparaître, parfois sous des formes différentes, que plusieurs milliers, voire dizaines de milliers d'années plus tard.

Est-il pertinent, alors, de rapprocher ces prémices de modernité, vieilles de 75 000 ans, et les cultures de chasseurs-cueilleurs, en tous points modernes, qui ont vécu en Afrique australe dans des temps historiques et au cours de la Préhistoire récente ? Tout d'abord, à quand remontent les innovations qui caractérisent ces cultures ? Jusque récemment, on pensait que les plus anciennes traces du mode de vie des chasseurs San d'Afrique australe remontaient à 20 000 ans. Mais nos travaux sur le matériel archéologique de Border Cave, dans le KwaZulu-Natal (Afrique du Sud), ont montré que de nombreux éléments de la culture matérielle des San faisaient partie du bagage culturel des habitants de ce site il y a 44 000 ans.

Nous avons daté et analysé les objets présents dans les couches archéologiques de ce site, qui se distingue par une conservation exceptionnelle de la matière organique. Nos résultats indiquent qu'il y a 44 000 ans, les habitants de cette cavité utilisaient des bâtons à fouir *(a)* alourdis par des pierres perforées, comme ceux utilisés traditionnellement par les San. Ils l'ornaient, comme eux, de perles en œuf d'autruche *(f)* et accumulaient des entailles sur des os pour en faire des outils de comptage ou de notation *(d)*. Ils fabriquaient de fines pointes en os décorées de gravures remplies d'ocre, destinées à être emmanchées sur de petites flèches empoisonnées, utilisées à la chasse avec des arcs *(c)*.

L'analyse chimique des résidus présents sur une baguette en bois décorée d'entailles révèle que cet objet a pu servir pour conserver et appliquer, à l'instar d'objets San utilisés dans la même fonction, un poison à base d'acide icinoléique *(b)*. Un morceau de cire d'abeille, mélangée avec la résine toxique d'*Euphorbia*, a été entouré d'une cordelette en fibres d'écorce d'arbre *(e)*. Ce « kit » pour emmancher des pointes de flèche ou des outils représente le plus ancien témoignage connu d'une utilisation de la cire d'abeille. Des résidus d'une poix produite à partir de sève découverts sur de petits éclats en pierre confirment que de tels éclats étaient utilisés dans la fabrication d'armes de chasse.

Ces découvertes, qui situent l'origine des cultures modernes telles que nous les connaissons à au moins 44 000 ans, corroborent l'idée que l'émergence des comportements dits modernes a suivi un processus non linéaire avec des pertes, des accélérations et, dans certains cas, le maintien pendant plusieurs dizaines de milliers d'années de systèmes techniques adaptés au mode de vie et à l'environnement de certaines populations. La créativité a longtemps été une réponse risquée à des pressions sélectives engendrées par des changements environnementaux. Pour comprendre les raisons qui ont poussé certains de nos ancêtres à courir ce risque, il est nécessaire de reconstituer l'histoire de l'interaction homme-environnement à l'échelle régionale.

Francesco d'Errico
Directeur de recherche au CNRS et professeur à l'Université de Bergen, en Norvège



Les barres d'échelle valent un centimètre

nourrit des fourmis. Elle répéta l'opération jusqu'à satiété.

Les chimpanzés utilisent avec habileté une vaste gamme d'outils : ils ouvrent des noix avec des pierres, épongent l'eau dans le creux des arbres à l'aide de feuilles et déterrent les racines de plantes nutritives avec des bâtons. Mais ils semblent incapables de construire quoi que se soit à partir de cette connaissance ou de développer des techniques plus perfectionnées. S'ils montrent leur savoir-faire à leurs congénères, ces derniers ne l'améliorent jamais et se contentent de le reproduire. Les hommes modernes, en revanche, ne souffrent pas de telles limitations. Les idées s'empruntent, se modifient, s'ajoutent, se complexifient. Les prouesses techniques actuelles, tel l'ordinateur portable, sont le fruit de la créativité de plusieurs générations d'inventeurs.

Effet cliquet culturel

Les anthropologues nomment ce talent propre à l'homme l'effet cliquet de la transmission culturelle. Il nécessite, avant tout, la capacité de transmettre la connaissance d'un individu à l'autre, ou d'une génération à la suivante, jusqu'à ce qu'émerge l'idée d'un perfectionnement. En mars 2012, Lewis Dean, un primatologue actuellement à la Société physiologique de Londres, et ses collègues ont révélé pourquoi les êtres humains ont la capacité de faire émerger une idée de cette façon, et pas les chimpanzés ou les singes capucins.

L. Dean et son équipe ont conçu un casse-tête à trois niveaux de difficulté. Ils ont présenté ce dispositif à des groupes de chimpanzés au Texas, de singes capucins en France et à des enfants de maternelle en Angleterre. Un seul des 55 primates non humains – un chimpanzé – a atteint le plus haut niveau après plus de 30 heures d'essais. Les enfants se sont beaucoup mieux débrouillés. Contrairement aux singes, ils ont travaillé en collaboration – discutant, s'encourageant et se montrant l'un l'autre la bonne façon de faire les choses. Après deux heures et demie, 15 des 35 enfants avaient atteint le niveau trois.

Dotés de telles compétences sociales et de leurs capacités cognitives, nos ancêtres pouvaient facilement transmettre leurs connaissances aux autres – un prérequis clé de l'effet cliquet. Cependant, pour Mark Thomas, généticien spécialiste de l'évolution à l'*University College* de Londres, un autre

© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013

élément était nécessaire pour déclencher ce processus : la démographie. Plus un groupe de chasseurs-cueilleurs était grand, meilleures étaient les chances qu'un membre du groupe ait une idée novatrice. En outre, les individus d'un groupe important côtoyant fréquemment des voisins avaient plus de chances d'apprendre une innovation que ceux appartenant à de petits groupes isolés.

Pour tester ces idées, M. Thomas et ses collègues ont modélisé l'impact de la démographie sur l'effet cliquet. À l'aide de données génétiques provenant d'Européens modernes, ils ont estimé la taille des populations humaines en Europe au début du Paléolithique supérieur, époque où la créativité semble être apparue dans cette région, et ont calculé la densité de population. Puis ils ont étudié les populations africaines au cours du temps, simulant leur croissance et leurs migrations. Leur modèle montre que les populations africaines ont atteint la même densité que les premiers Européens du Paléolithique supérieur il y a environ 101 000 ans, juste avant que l'innovation ne se manifeste dans les régions subsahariennes selon les témoignages archéologiques. Le modèle montre aussi qu'il existait alors de vastes réseaux sociaux.

L'apparition de grandes populations connectées a permis aux innovations de se répandre, telle cette recette d'arme de jet à base de lamelles retouchées en pierre, mise au point par *Homo sapiens* il y a environ 71 000 ans sur le site de Pinnacle Point et transmise à d'autres groupes : chauffer la silcrète à une température particulière pour en faciliter la taille, transformer le matériau en lames de quelques centimètres de long et fixer celles-ci sur une hampe en bois ou en os à l'aide d'une colle « maison ».

Un demi-millénaire après la création de *La Joconde*, nous nous émerveillons du génie de son auteur – un génie construit sur les innombrables idées et inventions de toute une lignée d'artistes remontant au Paléolithique. Et encore maintenant, des artistes portent un regard nouveau sur cette œuvre et en font émerger de nouvelles idées. La chaîne humaine de l'invention est solide. Et dans notre monde toujours plus connecté, le talent pour la création est plus que jamais vivace. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Vanhaeren *et al.*, **Thinking strings : additional evidence for personal ornament use in the Middle Stone Age of Blombos Cave, South Africa,** *J. of Hum. Evol.*, dx.doi.org/10.1016/j.jhevol.2013.02.001, 2013.

K. Brown *et al.*, **An early and enduring advanced technology originating 71 000 years ago in South Africa,** *Nature*, vol. 491, pp. 590-593, 2012.

D. Falk, **Hominin paleoneurology : where are we now ?,** *Progress in Brain Research*, vol. 195, pp. 255-272, 2012.

F. d'Errico *et al.*, **Early evidence of San material culture represented by organic artifacts from Border Cave, South Africa,** *PNAS*, vol. 109, pp. 13214-13219, 2012.

L. Wadley *et al.*, **Middle Stone Age bedding construction and settlement patterns at Sibudu, South Africa,** *Science*, vol. 334, pp. 1388-1391, 2011.





Dans le monde secret des cœlacanthes

Hugo Dutel, Marc Herbin, Laurent Ballesta et Gaël Clément

Espèce menacée vivant dans les profondeurs marines, le cœlacanthe est un poisson apparenté aux vertébrés terrestres et encore mal connu. Une équipe de plongeurs a réussi à l'observer dans son milieu naturel.

Il y a trois quarts de siècle, on découvrait avec stupéfaction un cœlacanthe vivant, alors que ce genre de poisson était censé avoir disparu depuis 70 millions d'années. Or la morphologie générale de l'animal mis au jour était très proche de celle de ses formes fossiles les plus récentes. Cette stabilité évolutive paraissait d'autant plus étonnante que l'on considérait alors le cœlacanthe comme à l'origine des tétrapodes, c'est-à-dire des vertébrés munis de quatre pattes se terminant par des doigts.

Aujourd'hui, les relations de parenté de *Latimeria chalumnae*, le cœlacanthe actuel, ont été précisées, et on ne le considère plus comme le plus proche parent des tétrapodes. Les paléontologues le placent plutôt dans un groupe réunissant les cœlacanthes, les dipneustes (des poissons à poumons) et les tétrapodes. Nous allons décrire ici la biologie de *Latimeria chalumnae* et sa place dans l'évolution, connaissances auxquelles nous avons contribué en l'étudiant par imagerie et en réalisant les premières plongées d'observation naturaliste en scaphandre du cœlacanthe dans son milieu de vie.

En 1938, un pêcheur sud-africain remonte dans ses filets un poisson inconnu. Il est signalé à Marjorie Courtenay-Latimer (1907-2004), la conservatrice du Musée d'East London, qui soupçonne qu'il s'agit d'un cœlacanthe. C'est l'ichtyologue James Brierley Smith qui décrit la nouvelle espèce et la nomme *Latimeria chalumnae* en l'honneur de miss Latimer. Depuis, ce poisson n'a cessé de passionner les scientifiques et le public. Les médias ont amplifié cet intérêt en l'affublant de surnoms à sensation tels que « fossile vivant », « survivant du Crétacé », « plus vieux poisson du monde »...

Le cœlacanthe, poisson à épines creuses

Smith avait su reconnaître un représentant du groupe des cœlacanthes, créé en 1839 par le paléontologue américano-suisse Louis Agassiz en référence aux rayons creux qui composent les nageoires des espèces fossiles qu'il étudiait : le grec *koilos* signifie « creux » tandis que *akantha* veut dire « épine ». Avant sa description, les paléontologues pensaient que les cœlacanthes s'étaient éteints à la fin du Crétacé (entre 145 et 66 millions d'années) en même temps que les dinosaures non aviens, de sorte qu'un cœlacanthe vivant constituait une immense surprise ; d'autant que, dans les années 1930, les paléontologues désignaient le cœlacanthe comme le plus proche parent actuel des tétrapodes.

La place cruciale de *Latimeria* dans l'évolution et sa forme apparemment identique à celle des cœlacanthes du Crétacé semblaient donner un aperçu sur le passé. Dès lors, son étude poussée promettait aux scientifiques de mieux comprendre la biologie des poissons à nageoires charnues, les « sarcoptérygiens ichtyens » ; ces proches cousins des tétrapodes ne sont représentés aujourd'hui que par les dipneustes et les cœlacanthes.

Si ces attentes sont aujourd'hui relativisées, il n'en reste pas moins que l'étude des cœlacanthes apporte d'importantes informations sur les changements évolutifs de certains complexes anatomiques

© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013



1. LE CŒLACANTHE, tel un sous-marin flottant dans les espaces sombres des profondeurs marines, attend placidement la nuit avant de s'activer... tranquillement.

tels que le crâne, les nageoires paires pédonculées, les poumons) ayant conduit à l'émergence des tétrapodes, il y a environ 370 millions d'années.

Après la découverte de 1938, il fallut attendre 1952 pour qu'un autre spécimen de cœlacanthe soit pêché, dans les eaux comoriennes cette fois. Dès lors, les captures se sont multipliées et ont enrichi les collections des muséums. Sous l'impulsion des directeurs successifs du Laboratoire d'anatomie comparée Jacques Millot et Jean Antony, le Muséum national d'histoire naturelle à Paris a constitué la plus importante collection de cœlacanthes du monde : elle comporte 15 spécimens entiers et plus de 300 pièces anatomiques issues de 36 spécimens différents. Grâce à cette exceptionnelle collection, les chercheurs du Muséum des années 1970 ont pu pousser très loin l'étude anatomique du cœlacanthe, ce qui s'est traduit par l'élaboration d'une monographie en trois volumes qui fait aujourd'hui référence sur le sujet.

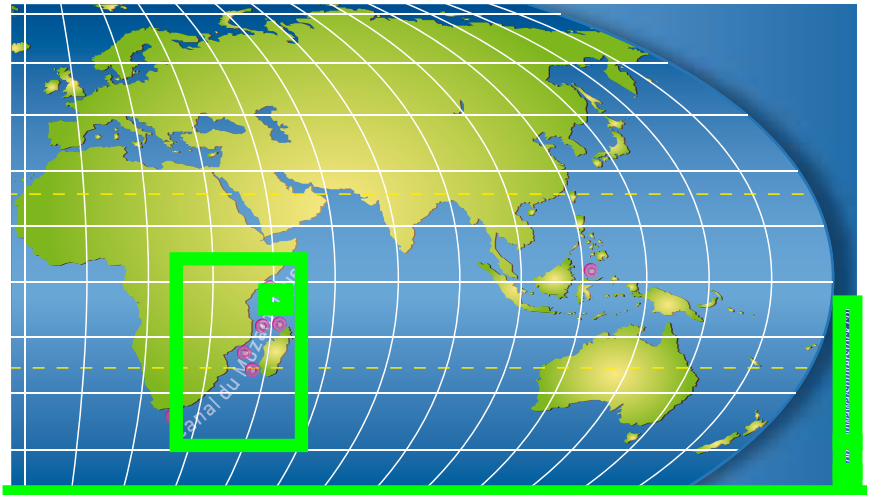
Les cœlacanthes ont une très longue histoire évolutive, puisque leurs premiers représentants ont été retrouvés dans des sédiments datés du début du Dévonien (entre 419 et 359 millions d'années), tandis que les plus récents fossiles de cœlacanthes datent de 70 millions d'années, donc de la fin du Crétacé. Au cours du temps, les cœlacanthes se sont fortement diversifiés, adoptant des morphologies, des tailles (de 0,3 à 6 mètres) et des environnements de vie variés. Plus d'une centaine d'espèces de cœlacanthes fossiles ont été décrites. Contrairement au genre actuel, strictement marin, un grand nombre de ces espèces semblent avoir vécu dans des eaux peu profondes douces ou saumâtres de lacs, de fleuves, d'estuaires, etc.

L'ESSENTIEL

- Il existe deux espèces actuelles de cœlacanthes, alors que l'on a longtemps cru éteints ces animaux proches des vertébrés terrestres.
- Leur anatomie est bien connue, mais pas leur biologie, leur écologie et leur comportement.
- Des plongeurs équipés de scaphandres autonomes élaborés ont réussi à observer des cœlacanthes dans leur milieu de vie.
- Cette avancée ouvre la voie à l'étude approfondie de ces animaux.

Vivant et non fossile

La diversité morphologique et écologique passée des cœlacanthes invalide donc l'idée que *Latimeria* serait une sorte de « fossile vivant ». La forme apparemment si peu variable des cœlacanthes s'explique par le fait que les attributs anatomiques qui cristallisent l'attention ont peu changé au

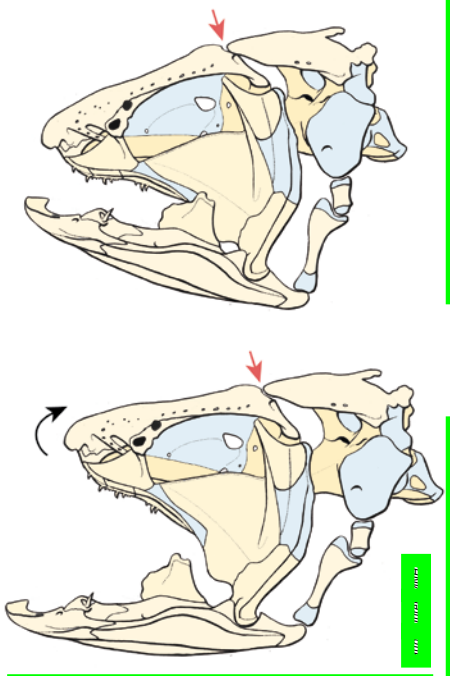


2. DEUX ESPECES DE CŒLACANTHES sont connues. La première vit dans le canal du Mozambique et en Afrique du Sud ; l'autre a été découverte fortuitement en Indonésie. Toutes deux aiment la discrétion des profondeurs (au-delà de 100 mètres).

cours des millions d'années. Fondée par l'entomologiste allemand Willi Hennig dans les années 1950, la systématique phylogénétique consiste à se représenter les organismes comme des mosaïques de caractères anatomiques relativement indépendants les uns des autres. En pratique, on peut considérer que les traits d'un organisme évoluent à des rythmes différents. Par conséquent, un même organisme porte à la fois des caractères ancestraux et des caractères dérivés, c'est-à-dire fortement modifiés au cours de l'histoire évolutive du groupe. Si certains caractères anatomiques n'ont presque pas changé depuis des millions d'années, d'autres ont pu connaître des modifications importantes.

La mosaïque de caractères du cœlacanthe rend singulier cet animal : il est le seul vertébré actuel dont certains traits étaient déjà présents chez les sarcoptérygiens à l'origine des tétrapodes. Ces caractères ancestraux, tels l'articulation intracrânienne, les nageoires charnues et pédonculées, et le poumon (en fait un court diverticule issu de l'œsophage), sont mêlés aux caractères dérivés, apparus au cours de l'évolution des cœlacanthes, telle la morphologie symétrique des os des nageoires *(voir l'encadré page ci-contre)*.

L'anatomie de *Latimeria* a captivé les chercheurs depuis sa découverte, mais de nombreuses questions persistent sur la fonction de certaines structures. On s'interroge par exemple sur le rôle de son organe rostral, une structure incluse dans le museau et censée être sensible aux impulsions électriques, ou encore sur celui de l'articulation intracrânienne dans la prise alimentaire *(voir la figure 3)*.



3. L'ARTICULATION INTRACRANIENNE est indiquée par la flèche rouge et divise le crâne du cœlacanthe en deux parties. Elle autoriserait un curieux mécanisme d'ouverture de la gueule : une élévation de 15 à 20 degrés du museau ferait pivoter la partie antérieure du crâne et abaisserait la mâchoire inférieure.

Latimeria chalumnae est l'une des espèces animales dont l'anatomie est la mieux connue *(voir l'encadré ci-contre)*, mais, paradoxalement, nous savons très peu de choses sur sa reproduction, son développement, son comportement et son écologie. Plusieurs raisons expliquent cet état de fait : d'une part, les populations actuelles de cœlacanthes sont restées discrètes jusqu'à récemment – la population de cœlacanthes des Comores ayant été longtemps la seule connue. Ce n'est qu'à partir des années 1990, et à l'occasion de captures ponctuelles, que de nouvelles populations ont été découvertes : au Mozambique en 1991, à Madagascar en 1995, en Afrique du Sud en 2000, au Kenya en 2001 et en Tanzanie en 2003 *(voir la figure 2)*.

A ces populations du canal du Mozambique s'est ajoutée en 1997 une population indonésienne. Cette année-là, un jeune postdoctorant américain en biologie marine et son épouse sont en voyage de noces sur l'île de Manado Tua, quand, dans un marché aux poissons, ils identifient un cœlacanthe ! Le premier spécimen d'une nouvelle population venait d'être découvert à 10 000 kilomètres du canal du Mozambique. Il s'agissait d'une espèce distincte de celle des cœlacanthes comoriens, que les paléontologues ont nommée *Latimeria menadoensis*.

Ils ne survivent pas en captivité

L'idée de remonter un cœlacanthe en surface pour l'étudier en captivité a souvent tenté les scientifiques et les aventuriers. Reste que toutes les tentatives ont échoué : aucun cœlacanthe n'a jamais pu être maintenu vivant en surface plus de quelques heures. Aucune des hypothèses avancées pour expliquer cette vulnérabilité ne fait consensus. La plus pertinente, mais qui reste à prouver, serait que les efforts du poisson pour se libérer entraîneraient une asphyxie (les cœlacanthes sont dotés de branchies très petites par rapport à leur taille), circonstance aggravée par une production d'acide lactique excessive (due aux efforts musculaires) pour le métabolisme lent du cœlacanthe. Quoi qu'il en soit, il faut espérer que ces tentatives pour remonter un cœlacanthe vivant seront les dernières. Du reste, *Latimeria* a été

© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013

L'ANATOMIE DE *LATIMERIA CHALUMNAE*

L'anatomie de *Latimeria*, le cœlacanthe actuel, présente de nombreux traits remarquables.

1 NAGEOIRES CHARNUES

Les appendices sont un caractère propre aux poissons sarcoptérygiens, dont sont issus les tétrapodes (lignée des vertébrés terrestres). Très similaires à celles de *Latimeria*, les nageoires charnues de la lignée des tétrapodomorphes – les sarcoptérygiens, à l'origine des tétrapodes – étaient les organes à l'origine de nos membres. La nageoire pectorale de *Latimeria* contient une série d'os gainée par des muscles, au bout de laquelle s'étirent les rayons soutenant les nageoires, qui sont caractéristiques des sarcoptérygiens. La nageoire pectorale (ou pelvienne) est articulée au reste du corps *via* un os unique, qui est l'homologue de l'humérus (ou du fémur).

2 JOINT INTRACRANIEN

Cette articulation est une particularité présente chez tous les poissons sarcoptérygiens fossiles, mais que les dipneustes (des poissons à poumons) et les tétrapodes ont perdue. Elle articule les parties antérieure et postérieure du crâne lorsque l'animal ouvre la gueule. La biomécanique de cette articulation et son éventuel rôle dans la prise alimentaire restent mal connus.

3 ORGANE ROSTRAL

Cet organe se trouve dans une cavité située dans le museau. Les cellules qui le constituent sont très similaires à celles qui forment les ampoules de Lorenzini, capteurs de champ électrique que présente le museau des requins. La structure comparable des ampoules de Lorenzini et des cellules de l'organe rostral du cœlacanthe suggèrent que *Latimeria* est doté du même genre d'électroperception que les squales.

4 POUMON VESTIGIAL

Le poumon consiste en un court diverticule issu de l'œsophage, entouré d'un manchon graisseux s'étirant dans la cavité abdominale. Non alvéolé, ce poumon n'est pas fonctionnel chez *Latimeria*. Toutefois, de nombreux cœlacanthes fossiles, en particulier les formes datant du Mésozoïque (de 252 à 66 millions d'années), sont dotés d'un sac ossifié, allongé et fortement vascularisé. L'étude récente de cette structure chez *Axelrodichthys*, un cœlacanthe du Crétacé, indique qu'il s'agissait d'un poumon fonctionnel.

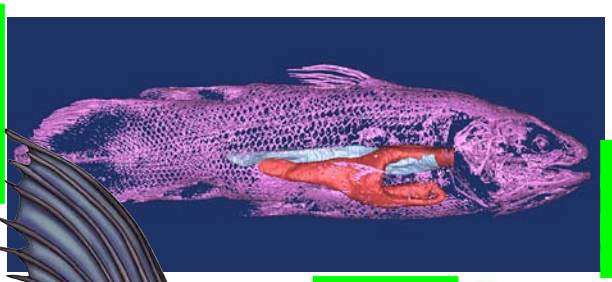
5 ENCÉPHALE

Le cerveau occupe environ un pourcent du volume de la cavité endocrânienne chez l'adulte, le reste étant rempli d'un tissu graisseux dans lequel s'étirent les nerfs crâniens et les vaisseaux sanguins.

6 OVOVIVIPARITÉ

Le cœlacanthe est ovovivipare, c'est-à-dire que les œufs se développent et éclosent à l'intérieur de la femelle. Les embryons ont une morphologie très semblable à celle des adultes et se développent grâce un sac rempli de réserves nutritives (sac vitellin). Les femelles peuvent porter jusqu'à 26 embryons dont la taille atteint parfois 30 centimètres. On ignore si la durée de gestation se compte en mois ou en années, et le développement embryonnaire précoce demeure inconnu.

Les techniques d'imagerie moderne, telles que l'imagerie par résonance magnétique ou le scanner à rayons X, permettent de modéliser en trois dimensions les structures anatomiques internes. Ci-contre, il s'agit de l'appareil digestif *(en rouge)* et du manchon graisseux d'origine pulmonaire *(en bleu)*. Les chercheurs comprennent ainsi beaucoup mieux les relations entre les structures internes.





L'un des traits anatomiques remarquables de *Latimeria chalumnae* est sa curieuse nageoire caudale secondaire, que l'on aperçoit ci-dessus, à gauche à l'extrémité de la colonne vertébrale.

placé sur la liste rouge des espèces « en danger critique d'extinction » de l'Union internationale pour la conservation de la nature (IUCN), ce qui interdit toute pêche, y compris scientifique.

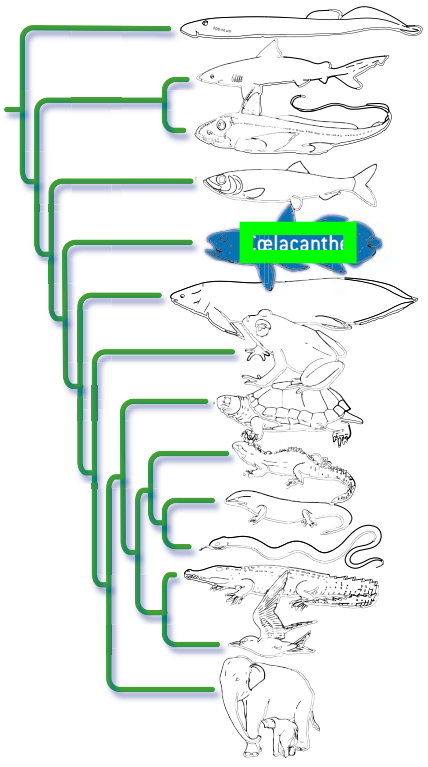
La piste de l'étude anatomique d'un cœlacanthe vivant étant impraticable, nous nous sommes retournés vers un spécimen conservé dans un fluide au Muséum, à Paris. Placé sur un brancard, ce spécimen pêché il y a 60 ans a d'abord été examiné par un scanner à rayons X, puis par un appareil d'imagerie par résonance magnétique (IRM). Avec les nombreuses coupes virtuelles de son corps ainsi obtenues, nous avons construit un modèle virtuel en trois dimensions très détaillé de l'anatomie du cœlacanthe, à l'aide duquel nous avons simulé le fonctionnement de certaines structures, telle l'articulation intracrânienne. Cela nous a aidés à clarifier l'histoire évolutive compliquée des cœlacanthes *(voir la figure 4)*.

Une technique inédite de plongée profonde

La priorité suivante semble être de faire progresser la biologie, la zoologie et l'écologie du cœlacanthe actuel. Cela implique de parvenir à l'étudier dans son environnement. À plus de 200 mètres de profondeur, la méthode la plus logique, car la plus sûre, consiste à employer des submersibles. C'est ce qu'a fait aux Comores dès 1986 le biologiste Hans Fricke, de l'Université de Munich. Les quelque 200 plongées réalisées jusqu'au début des années 1990 ont fourni les premières informations essentielles sur le mode de vie de *Latimeria* : on a ainsi appris qu'il s'agit d'un animal placide, aux déplacements lents, qui s'active la nuit et se repose le jour dans quelque cavité.

L'arrivée d'un engin massif et sonore perturbe toutefois les animaux qui vivent dans le calme des profondeurs. Pour étudier plus avant le comportement de *Latimeria*, il fallait l'observer et l'étudier sans le stresser, ni même le perturber. Comment faire ?

En plongeant sans submersible ! Courant 2000, nous avons appris la présence d'une population de cœlacanthes vivant dans les eaux de la baie de Sodwana, au Nord-Est de l'Afrique du Sud, par seulement 120 mètres de profondeur. Or dans l'espoir de rendre possible l'exploration de la zone aphotique – la partie de la colonne d'eau où la lumière ne pénètre plus –, l'équipe de



4. LA POSITION DU CŒLACANTHE ACTUEL dans l'arbre phylogénétique simplifié des vertébrés (d'après Philippe Janvier, 1996).

plongeurs professionnels de l'un d'entre nous (L. Ballesta) développe depuis une dizaine d'années une méthode innovante de plongée profonde. Cette technique est fondée sur des scaphandres recycleurs gérant en circuit fermé le mélange respiratoire, système qui permet en particulier d'éviter de s'équiper d'une multitude de bouteilles. Le plongeur emporte plutôt une quantité limitée de mélange qui sera recyclé grâce à une électronique dédiée. Très technique, la mise au point de ce recyclage, non seulement évite la narcose (impératif !), mais donne le temps de passer plusieurs dizaines de minutes au fond avant les nombreux paliers de décompression d'une remontée qui durera de six à sept heures *(voir la figure 7)*.

Ces évolutions techniques mettaient les cœlacanthes de la baie de Sodwana à notre portée. Toutefois, les plongées dans la zone aphotique exigent une grande préparation technique, physique et mentale. La mise au point de nos techniques de plongée profonde a fini par l'organisation, en janvier 2010, d'une expédition pour aller observer les cœlacanthes de la baie de Sodwana. Nous y avons enchaîné plusieurs séjours techniques sous l'eau, durant lesquels nous avons pu passer de 30 à 40 minutes en contact avec les cœlacanthes, avant quatre à six heures de paliers de décompression…

Une façon de nager atypique

Le temps passé au fond était donc limité, mais suffisant pour entrer avec douceur dans l'environnement immédiat des animaux et y agir de façon beaucoup plus discrète, efficace et rapide que cela n'aurait été possible avec un robot plongeur.

L'objectif de cette première campagne scientifique était simple : accumuler le plus possible d'observations naturalistes des cœlacanthes dans leur élément, sans les perturber ou les mettre en danger. Les photographies et les films en haute définition que nous avons rapportés prouvent que nous y sommes parvenus. On y voit une sorte de patriarche serein des profondeurs, un cœlacanthe curieux et tranquille occupé à observer… ses observateurs.

La question de la nage du cœlacanthe nous intéressait en priorité. Avant les premières observations directes, notamment les précieuses prises de vue depuis un sous-marin rapportées par H. Fricke dans les années 1980, on avait longtemps supposé

© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013

que le cœlacanthe rampait, voire marchait, sur le fond marin à l'aide de ses paires de nageoires pédonculées... Les images de H. Fricke montraient en réalité *Latimeria* pratiquant en pleine eau une nage aussi harmonieuse qu'atypique, mettant en jeu l'ensemble de ses nageoires dans un ballet à la coordination complexe.

La nage du cœlacanthe ressemble parfois à la reptation d'un lézard, voire à la marche de tout tétrapode terrestre. Au cours de nos plongées, nous avons effectivement observé que le cœlacanthe meut l'une de ses nageoires pectorales en même temps que la nageoire pelvienne opposée, puis la paire opposée de nageoires. Nous avons constaté que ce comportement est spontané chez *Latimeria*.

Une autre évidence nous a frappés : le cœlacanthe nage presque toujours très lentement et stationne souvent. Ainsi, le premier cœlacanthe que nous avons trouvé était tranquillement posté à l'entrée de sa grotte ; il nous a observés un moment, puis s'est lentement élevé dans les eaux. Il a alors principalement utilisé sa nageoire anale et sa deuxième nageoire dorsale qui, telles des hélices tournant au ralenti, bougeaient lentement pour lui permettre d'accomplir avec précision les déplacements souhaités.

Un point qui frappe tous les naturalistes ayant observé des cœlacanthes, tant fossiles que vivants, est que ces animaux sont dotés d'une minuscule nageoire caudale secondaire prolongeant leur nageoire caudale principale *(voir la figure 5)*. Quelle est sa fonction ?

La nageoire caudale des poissons sert, comme une godille, à les propulser en poussant des masses d'eau alternativement d'un côté et de l'autre. Grâce à leur souplesse, les requins, par exemple, se déplacent en accompagnant les flux d'eau par un mouvement ajusté de façon à limiter les brusques variations de vitesse et les turbulences énergivores associées.

La présence de la nageoire secondaire miniature au centre de la nageoire caudale principale suggère que *Latimeria* peut s'en servir pour obtenir les mêmes avantages à petite échelle, afin de pratiquer une nage lente, sans doute très discrète. Est-ce là le seul usage que fait *Latimeria* de sa nageoire caudale ? Non. Il est arrivé que, lassé par la compagnie du groupe de plongeurs, un individu s'éloigne brusquement de dix mètres d'un puissant coup de queue pour… stationner de nouveau, comme s'il se jouait des plongeurs.

Pourquoi n'enchaîne-t-il pas ses coups de queue afin de semer définitivement les plongeurs ? Si le dispositif caudal de *Latimeria* le rend manifestement capable de brusques avancées, son métabolisme probablement très lent lui interdirait de les renouveler.

Comment chasse-t-il ?

Cette observation suggère la façon dont *Latimeria* chasse probablement. Les individus que nous avons observés étaient de taille imposante, donc adultes. Il se pourrait que les cœlacanthes matures soient les seuls à séjourner à des profondeurs relativement faibles. Dans la grotte qui leur sert de lieu de repos, ils ne semblent pas d'humeur à se nourrir : nous n'avons vu aucune prédation, puisqu'ils sortent uniquement la nuit pour

LES AUTEURS

Hugo DUTEL, doctorant au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, prépare une thèse sur l'histoire évolutive et la biologie des cœlacanthes.

Marc HERBIN est biologiste spécialisé en morphologie fonctionnelle au Muséum national d'histoire naturelle.

Laurent BALLESTA, biologiste marin et photographe, a fondé et dirige la Société d'étude et d'exploration *Andromède océanologie*.

Gaël CLEMENT est paléontologue au Muséum national d'histoire naturelle.





5. LA PREMIERE RENCONTRE AMICALE ENTRE L'HOMME ET LE CŒLACANTHE s'est déroulée dans une ambiance sereine, ce poisson curieux et placide n'ayant craint ni de se laisser approcher ni de se laisser baigner dans la lumière des projecteurs *(en haut)*. En bas, un détail de la curieuse nageoire secondaire postérieure dont est doté l'animal.

chasser. Les cœlacanthes peuvent descendre à plus de 500 mètres, où règne une obscurité totale, en se servant peut-être des capteurs de champ électrique présents dans leur organe rostral pour repérer leurs proies.

Comment s'effectue la prise alimentaire d'un cœlacanthe ? Nous pensons que l'articulation intracrânienne évoquée plus haut intervient. On a longtemps supposé que ce dispositif complexe, qui n'est connu dans les espèces actuelles que chez le cœlacanthe, permet à l'animal, par une élévation de 15 à 20 degrés du museau, d'ouvrir brusquement sa gueule afin de créer une puissante aspiration. Toutefois, à la lumière des données acquises par imagerie à rayons X, il semble que cette articulation ne puisse être aussi mobile qu'on ne le pensait. Filmer un cœlacanthe en train de capturer une proie nous permettrait de le confirmer.

Une nageoire caudale secondaire pour les mouvements fins ?

Quoi qu'il en soit, sans doute est-ce dans la chasse que les puissants coups de queue du cœlacanthe jouent leur rôle ; quant aux furtifs mouvements de sa petite nageoire caudale secondaire, ils le rendent peut-être capable d'approches lentes et patientes dans le noir… *Latimeria* resterait donc à l'affût jusqu'à percevoir la présence d'une proie grâce à son système de sensibilité électrique ; il s'en rapprocherait d'abord doucement, puis vite avant de déclencher une aspiration « implosive » quand il est tout près de sa victime. Un scénario à infirmer ou confirmer par des observations directes…

Nous planifions une deuxième expédition afin de pousser l'étude scientifique du comportement de *Latimeria chalumnae* au-delà des simples observations. Nous préparons pour cela une série de protocoles expérimentaux compte tenu du savoir-faire acquis quant à la façon d'approcher ce poisson sans le perturber.

Le premier de ces protocoles a pour objectif de préciser la coordination motrice de *Latimeria*. Nous prévoyons de filmer sa nage avec un système stéréoscopique de deux caméras de haute définition prenant chacune 500 vues par seconde. Une prise de données que seule l'expérience acquise dans l'exploitation de telles caméras à grande profondeur rend envisageable.

Une fois la coordination motrice du cœlacanthe vivant saisie en images, les mouvements de ses articulations seront analysés en mettant en relation les mouvements du squelette avec ceux de l'enveloppe corporelle. Cette étape, que nous préparons, peut être franchie grâce à la tomodensitométrie (passage au scanner à rayons X) ou l'imagerie par résonance magnétique d'un spécimen issu des collections en fluide du Muséum, puis en ajoutant les mouvements filmés de l'enveloppe corporelle de l'animal. Nous espérons ainsi comprendre comment évolue la géométrie du squelette au cours de la nage, voire au cours de la prise de nourriture.

Pour ce faire, nous tenterons de forcer la chance en proposant une proie (un calmar) au cœlacanthe. Tandis qu'un plongeur s'acquittera de cette tâche, un autre filmera le déroulement de la scène de prédation. *Latimeria* se prêtera-t-il au jeu ? Afin d'agir dans les conditions optimales, ces films de la locomotion et de la prise alimentaire du cœlacanthe seront réalisés de nuit, lorsque l'animal est en pleine activité.

Un protocole est aussi prévu pour apprécier la diversité génétique de la population de *Latimeria* de la baie de Sodwana. On sait en effet qu'un brassage génétique insuffisant multiplie les problèmes de consanguinité et de faiblesse immunitaire au sein d'une population. Pour l'heure, seulement 27 individus ont été répertoriés. Cela suggère que les effectifs de cette population de cœlacanthes sont réduits, même si d'autres

BIBLIOGRAPHIE

H. Fricke *et al.*, **The population biology of the living coelacanth studied over 21 years,** *Marine Biology*, vol. 158, pp. 1511-1522, 2011.

K. Hissmann *et al.*, **The South African coelacanths – an account of what is known after three submersible expeditions,** *South African Journal of Science*, vol. 102, pp. 491-500, 2006.

P. L. Forey, **History of the Coelacanth Fishes,** Chapman and Hall, 1998.

J. Millot et J. Anthony, **Anatomie de *Latimeria chalumnae***, vol. 1, Squelette et muscles, CNRS, 1958.

S. Lecointre *et al.*, **Du rififi chez les poissons,** *Pour la Science* n° 390, pp. 56-63, 2010.



5. CE CŒLACANTHE FOSSILE est mort au Jurassique. Il a été fossilisé dans les sédiments fins formant aujourd'hui un magnifique calcaire lithographique. On reconnaît la nageoire postérieure secondaire, caractéristique des cœlacanthes depuis des centaines de millions d'années.

© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013

individus de la même population vivent probablement à des profondeurs inaccessibles en plongée autonome. Il sera donc intéressant d'évaluer la diversité génétique de la « population d'altitude » afin d'estimer le degré de fragilité de la population globale de cœlacanthes de la baie de Sodwana, et ce sans prélever des tissus sur des spécimens fraîchement pêchés ou arracher des écailles à l'aide de harpons équipant les robots sous-marins…

Au cours de la première expédition, nous nous sommes interdits de toucher le corps des poissons. Mais la tranquillité des face-à-face que nous avons vécus suggère que nous pourrons pratiquer de délicates caresses afin de prélever du bout d'un coton-tige un peu du mucus qui couvre les écailles. Les minuscules échantillons ainsi recueillis contiendront assez de cellules pour effectuer des analyses en laboratoire.

Une autre méthode issue des progrès de la métagénomique (étude du contenu génétique d'un échantillon issu d'un environnement complexe) permettra de séquencer directement des fragments d'ADN de cœlacanthe en suspension dans les grottes sous-marines où séjournent ces animaux : les plongeurs n'auront qu'à ramener en surface quelques litres d'eau de mer. Ce type de prélèvement protège les animaux de tout stress. Les analyses génétiques devraient nous permettre de déterminer si les cœlacanthes d'Afrique du Sud représentent une population réellement isolée, ou si des gènes circulent entre les différentes populations du canal du Mozambique.

Nous prévoyons aussi de compléter ces études génétiques par des suivis télémétriques de cœlacanthes à l'aide de balises acoustiques et satellitaires. Le suivi télémétrique de femelles adultes nous permettra peut-être de répondre à l'importante question du milieu de vie des juvéniles. Les cœlacanthes sont en effet ovovivipares, c'est-à-dire que les œufs et les embryons se développent dans l'oviducte de la mère, avant que cette dernière ne donne naissance à des jeunes entièrement formés et longs d'une trentaine de centimètres *(voir l'encadré page 33)*. Où vivent-ils, une fois nés ?

Sur les quelque 300 individus officiellement répertoriés dans les collections du monde entier, les individus juvéniles de moins de 80 centimètres de long se comptent sur les doigts d'une main. En 2009, une équipe japonaise a réussi à filmer dans les eaux indonésiennes un cœlacanthe de moins de 40 centimètres. Cette quasi-absence de juvéniles au sein des populations connues est mystérieuse. Elle suggère l'existence de zones de mise bas et de développement des jeunes dans des territoires marins, sans doute profonds, qui restent à déterminer. Nous espérons ainsi que le suivi d'une femelle nous aidera à découvrir les nurseries des cœlacanthes.



7. UNE EXPEDITION SCIENTIFIQUE EST PREVUE POUR 2013, qui sera le sujet d'un film sur la chaîne de télévision *Arte*. Tandis que les chercheurs du Muséum ont élaboré des protocoles scientifiques, les plongeurs-explorateurs l'ont préparée en mettant au point les techniques nécessaires avec le soutien de fabricants spécialisés en matériel de plongée, de prise de vue sous l'eau et de montres de plongée.

Protéger les cœlacanthes

Par ailleurs, la connaissance des déplacements des cœlacanthes, en particulier sur de grandes distances, voire entre populations différentes, est nécessaire pour déterminer comment les protéger. Les cœlacanthes font malheureusement partie de ces espèces fragiles et à croissance lente que la pratique du chalut profond met en danger. Par cette détestable technique, qui consiste à traîner au fond de l'océan une lourde poutre d'acier à laquelle est arrimé un filet, les pêcheurs modernes prélèvent à grande vitesse les espèces marines profondes, alors qu'elles sont à peine connues et avant qu'elles aient été véritablement étudiées. Après avoir surpêché les plateaux continentaux, ils apprécient aujourd'hui de pêcher à grande profondeur les poissons de belle taille que l'on y trouve. Mais est-ce sensé alors que les effectifs de poissons profonds sont faibles ?

C'est pourquoi un des enjeux de nos recherches est de contribuer à rassembler le plus vite possible les arguments et les méthodes nécessaires à la conservation des deux espèces actuelles de cœlacanthes. Comme elles passent pour des espèces apparentées aux vertébrés terrestres, donc à l'homme, et qu'elles sont célèbres, il existe sans doute des chances de les sauver. Nous espérons en particulier que les résultats du suivi télémétrique de membres de la population de la baie de Sodwana aideront à mettre en place la meilleure politique de conservation possible. Et que cette dernière sera ensuite applicable aux autres populations de cœlacanthes du reste de l'océan Indien. Les données rassemblées par les biologistes contribueront par ailleurs à informer les populations locales, qui dépendent des ressources marines sur la façon dont elles peuvent participer à la protection des cœlacanthes.

Au niveau international, nous espérons que les réglementations de protection des espèces menacées seront appliquées strictement à *Latimeria chalumnae* et à *Latimeria menadoensis*. De telles mesures seront d'autant plus efficaces qu'il sera possible de les justifier par le progrès des connaissances biologiques et zoologiques sur les cœlacanthes dans leur environnement. Une course est aujourd'hui engagée pour sauver un groupe animal présent sur Terre depuis plus de 400 millions d'années. ■



L'étonnant retour de la MÉDECINE traditionnelle chinoise

Paul Unschuld

La Chine moderne a voulu remplacer son ancienne tradition thérapeutique par la médecine occidentale. Mais l'intérêt occidental pour la médecine traditionnelle chinoise a entraîné une renaissance de cette dernière.

Médecine traditionnelle ? Les traditions sont aussi difficiles à définir qu'à dater. Essayez par exemple de dater à l'aide de *Google* ce que l'Organisation mondiale de la santé nomme la TCM, c'est-à-dire la médecine traditionnelle chinoise *(Traditional Chinese Medicine)*. Le moteur de recherche vous renverra des affirmations contradictoires. D'un côté, cette médecine sera dite « vieille de quelques milliers d'années » (sur le site d'un laboratoire pharmaceutique), « généralement datée de 3 000 ans avant J.-C. » *(Wikipedia)*, « hexamillénaire », etc. D'un autre côté, vous lirez dans le même article de *Wikipedia* que les « premiers écrits médicaux attestés datent d'entre 580 et 320 avant J.-C. » ; ailleurs, Jean-Marc Stéphan, médecin enseignant l'acupuncture obstétricale à l'Université de Lille 2, rapporte dans son *Abrégé de l'histoire de la médecine chinoise* que cette médecine est en fait une « tradition inventée » à la fondation de la Chine communiste…

Ainsi, s'il y a bien une tradition concernant la médecine traditionnelle chinoise, c'est de lui attribuer une ancienneté légendaire ! Nous allons replacer cette médecine traditionnelle dans son contexte historique et montrer que cet ensemble de pratiques thérapeutiques, qui est enseigné aujourd'hui dans nos facultés, est davantage une médecine chinoise qu'une médecine traditionnelle.

Un historien n'a guère d'incertitudes sur les origines et l'ancienneté de la médecine chinoise. Il peut en effet se référer aux nombreuses découvertes réalisées dans les tombes chinoises du IIe siècle avant notre ère, qui prouvent la transmission en Chine d'un art médical depuis les temps préhistoriques. Parmi ces trouvailles, des textes montrent que cet art avait déjà atteint un haut niveau de développement dans les siècles qui ont précédé notre ère. Plusieurs centaines de substances végétales, minérales ou animales étaient alors employées pour traiter maladies et blessures, ainsi que des produits manufacturés, tels des goudrons ou encore des tapis de paille.

L'ESSENTIEL

- La Chine moderne considérait la médecine traditionnelle comme antiscientifique, de sorte que l'on a cherché à l'encadrer et à y sélectionner ce qui paraissait efficace.
- Toutefois, les Occidentaux qui ont visité la Chine dans les années 1970 ont confondu le résultat de cette rationalisation avec la médecine antique.
- Un développement de la « médecine traditionnelle chinoise » s'en est suivi en Occident, que la Chine exploite commercialement tout en le craignant.

© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013



Les textes révèlent des préparations pharmaceutiques complexes et des modes d'administration élaborés – pilules, lotions, avantes, infusions, etc. Il n'y a guère dans tout cela de système thérapeutique cohérent, car on fait aussi des lectures magiques de la maladie et discute des meilleures façons de chasser les démons présents dans le corps ; toute cette magie n'est nullement mise en rapport avec les préparations médicamenteuses fines que l'on administre par ailleurs.

Une nouvelle façon de soigner apparaît à partir du IIe siècle avant notre ère. Elle correspond exactement à ce que nous nommons aujourd'hui la médecine. En effet, un groupe d'intellectuels a émis l'idée que la qualité et la durée de la vie dépendent de lois naturelles, et non pas de démons ou d'ancêtres, comme l'implique la notion de destinée alors ancrée à l'extrême en Chine. Ce progrès accompli, il est naturel que ces penseurs aient proposé que l'être humain puisse prendre en mains son destin et doive le faire.

Pendant ce qui peut être considéré comme les débuts des sciences naturelles en Chine, on oscille entre, d'une part, l'analyse des choses à partir de leurs composants élémentaires (comme chez les philosophes méditerranéens de l'Antiquité) et, d'autre part, le principe suivant lequel

> *La médecine chinoise est un grand trésor du patrimoine et tout doit être fait pour l'explorer et l'élever à un plus haut niveau de connaissance*
>
> Jan Zedong, octobre 1945

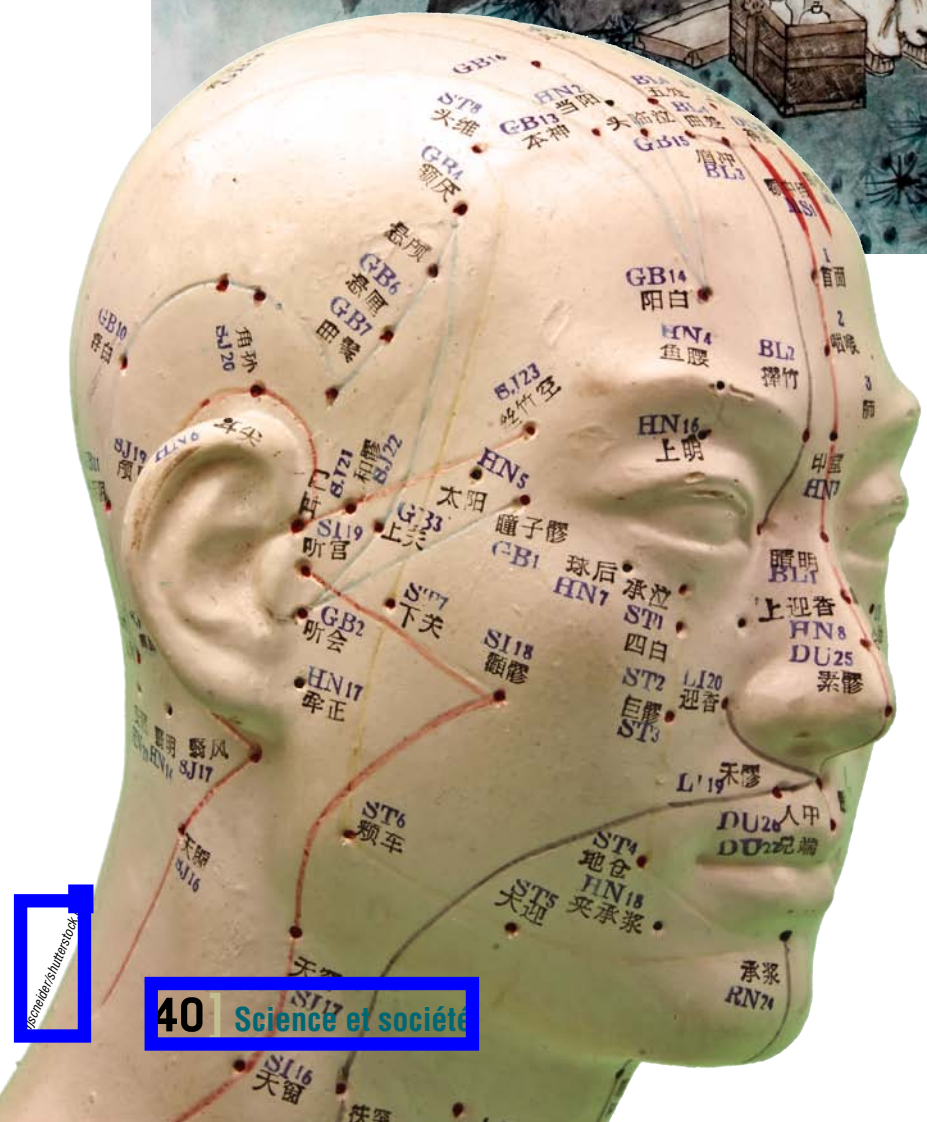
il faut essayer de comprendre le monde à partir des relations qu'entretiennent les choses entre elles.

Jusqu'à l'irruption des sciences et des techniques occidentales aux XIXe et XXe siècles, c'est-à-dire pendant 2000 ans, ce principe sera beaucoup suivi en Chine. L'être et l'évolution de tout phénomène sont expliqués par un système de lois profanes (sans essence religieuse), mais surtout relationnelles (consistant à établir des liens). Dans les systèmes qui en résulteront, tous les phénomènes et objets du monde seront répartis dans des catégories regroupant des éléments de même nature. Au nombre de deux, quatre, six ou encore douze dans le système du yin et du yang, et au nombre de cinq dans la théorie cosmologique des Cinq Phases (*wuxing*), ces catégories ont entre elles des relations obéissant à des lois précises.

À partir du IIe siècle avant notre ère, les érudits chinois appliquent ce genre de système à l'interprétation des notions de santé ou de maladie. Point commun avec la situation européenne où règne la théologie chrétienne, ils doivent affronter en permanence (jusqu'à très récemment !) une conception concurrente, qui contredit la possibilité d'une autodétermination. Ainsi, quand ils déclarent que « Mon destin repose entre mes mains et



L. A LA MEDECINE CHINOISE, l'acupuncture notamment, on attribue volontiers un passé de plusieurs millénaires. En témoigne cette représentation du médecin Hua Tuo (110-207) en train d'implanter des aiguilles. Pour le gouvernement chinois, en revanche, cette médecine devra s'appuyer davantage sur les sciences biologiques.



pjcmedet/shutterstock

non au ciel », leurs rivaux répondent que « Les plans des hommes ne sont rien en comparaison de ceux qu'échafaude le ciel ».

La société chinoise était alors influencée par les confucianistes et les juristes, d'une part, et par les taoïstes, d'autre part. Les premiers proposaient la recherche d'une harmonie sociale par le respect d'une morale et de lois claires. La médecine qui apparaissait en Chine était plus proche du confucianisme et de l'esprit des juristes qu'elle ne l'était du taoïsme.

Selon les préceptes de cette médecine, l'être humain, afin d'être récompensé par une bonne santé, devait savoir mettre des bornes à ses émotions et vivre en tenant compte des lois naturelles. Cette médecine ordonnée où les règles abondent impliquait donc de se concentrer sur son mode de vie afin de préserver la santé ; c'est elle qui, pour aider à faire passer les malaises légers, introduisit l'acupuncture.

Pour leur part, les taoïstes, du moins au début, pensaient qu'il fallait vivre dans la nature et en accord avec elle, de sorte qu'ils rejetaient les contraintes des confucianistes et des juristes. Pour eux, la maladie était un phénomène naturel, et l'on pouvait tomber malade quel que soit le nombre de règles que l'on respecte.

L'influence du taoïsme

La médecine taoïste n'a cessé de chercher à connaître les substances naturelles permettant de se soigner. Les très nombreuses recettes et méthodes thérapeutiques qui en résultaient étaient transmises oralement et consignées dans les textes. Or c'est cette pharmacopée chinoise qui est devenue la colonne vertébrale de l'art de soigner en Chine. En témoignent notamment les nombreux ouvrages qui lui ont été consacrés, alors que l'acupuncture, pratique plus secondaire, n'a pas fait l'objet d'une grande compilation avant 1601. Les nombreux livres anciens de recettes pharmaceutiques indiquent la progression des connaissances : au XVI[e] siècle, ils contenaient jusqu'à 2 000 descriptions ; plus de 60 000 prescriptions possibles les complétaient, et il ne s'agit là que de la partie immergée de l'iceberg.

Comme la médecine occidentale, la médecine chinoise semble perdre son orientation générale à partir du XIV[e] siècle. Elle se divise alors en plusieurs écoles et modes. Ainsi, en 1754, le médecin et auteur Xu Dachun (1693-1771), contemporain

© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013

du pathologiste italien Giovanni Battista Morgagni (1682-1771), annonça que l'acupuncture était une tradition perdue. Une opinion que partageaient les autorités, puisqu'en 1822, le gouvernement déclara cet art à éviter étant donné qu'il n'était plus pratiqué avec assez de compétence.

En 1915, Chen Duxiu, le futur cofondateur et secrétaire général du Parti communiste chinois, lance un appel à la jeunesse de son pays. Cet occidentaliste convaincu y reproche aux médecins chinois l'état déplorable de leurs connaissances. Il s'agit là d'une réaction de désespoir : depuis 70 ans, l'Angleterre, la France, les États-Unis, la Russie, l'Allemagne, l'Espagne, le Portugal, la Hollande et même le petit royaume insulaire du Japon imposent à la Chine une humiliation après l'autre, et notamment la réduction de plus de la moitié de son intégrité politique et territoriale. Les réformateurs chinois et les révolutionnaires ne voient qu'une seule porte de sortie : il faut, comme le Japon, assimiler les sciences et les techniques occidentales. Selon eux, c'est seulement ainsi que l'Empire du Milieu retrouvera son indépendance.

Par des mots très durs, Chen Duxiu et ses collaborateurs rendent la tradition chinoise responsable de l'abaissement de la Chine. Cette prise de position place la pratique médicale traditionnelle sous le feu des critiques : au lieu de soulager les gens, elle ferait partie de la maladie, n'hésite-t-on pas à avancer.

Le pouvoir chinois contre la médecine traditionnelle

Chen Duxiu n'est pas seul à penser ainsi : les réformateurs de tous bords politiques sont persuadés que pour parvenir à bien soigner en Chine, il faut commencer par y éradiquer le plus vite possible la médecine traditionnelle chinoise… Dans leurs romans, les écrivains Lu Xun (1881-1936), Ba Jin (1904-2005) et d'autres mettent au pilori les diagnostics absurdes et les soins catastrophiques donnés par les médecins traditionnels. En 1922, la profession des médecins traditionnels est ridiculisée dans le premier film burlesque chinois, intitulé *L'amour d'un marchand de légumes*. Dans les années 1910 et 1920, on tentera même d'interdire la médecine chinoise – sans succès.

Après la fondation de la République populaire de Chine en 1949, Mao Zedong considère pour sa part qu'il est vain de chercher à mettre fin rapidement à une médecine, certes méprisée par les dirigeants, mais enracinée dans le peuple. Le Grand Timonier invite à considérer la tradition comme un grand coffre aux trésors, dont il importe cependant de savoir tirer les véritables richesses. Depuis, la politique officielle chinoise en matière de médecine est définie d'après cette maxime.

Du début des années 1950 jusqu'au milieu des années 1960, une commission était chargée de déterminer quels étaient les « trésors » de la pratique médicale traditionnelle chinoise, c'est-à-dire quelles recettes et quelles pratiques pouvaient être conservées par un État socialiste moderne, censé avoir une approche rationnelle de toute question.

La plupart des membres de la commission étaient des médecins formés à l'occidentale. Leur vision du monde se reflète dans les recommandations qu'ils firent afin de construire une « médecine traditionnelle chinoise », c'est-à-dire une pratique médicale rationalisée et d'inspiration traditionnelle. C'est cette pratique qui a été nommée TCM (du moins par l'Organisation mondiale de la santé). Il faut la considérer comme une partie de la médecine que l'on pratique couramment aujourd'hui en République populaire de Chine.

Ce projet d'État avait bien un décorum historique, mais ses motivations étaient



2. LES PRATICIENS DE LA MÉDECINE CHINOISE DITE TRADITIONNELLE emploient souvent les mêmes moyens diagnostiques que les médecins occidentaux (ici un stéthoscope), même si aucun lien rationnel n'existe entre cette médecine pseudotraditionnelle et la médecine occidentale. En Chine, nombreux sont les médecins directement employés par les pharmaciens ou par les hôpitaux. Une part du chiffre d'affaires de ces employeurs est représentée par les prescriptions des médecins, ce qui influence le comportement de ces derniers.

L'AUTEUR



Paul UNSCHULD, sinologue, dirige l'Institut Horst-Görtz de théorie, histoire et éthique des sciences biologiques chinoises de la Clinique universitaire de la Charité à Berlin, en Allemagne.

BIBLIOGRAPHIE

P. Unschuld, **Approches occidentales et orientales de la guérison**, Springer, 2012

P. Unschuld, **Ware Gesundheit, Das Ende der klassischen Medizin**, Beck, 2011.

La médecine chinoise, *Le Monde des religions*, hors-série n° 7, pp. 52-54, 2008

P. Unschuld, **Huang Di Nei Jing Su Wen : Nature, Knowledge, Imagery in an Ancient Chinese Medical Text**, University of California Press, 2003.

P. Unschuld, **Chinesische Medizin**, Beck, 2003.

© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013



3. CES DIVERSES RECETTES DE LA PHARMACOPÉE CHINOISE illustrent que sa pratique consiste à réaliser un grand nombre de mélanges d'herbes médicinales, mais aussi de substances animales, telles des étoiles de mer, des cornes d'animaux, etc. Cela a notamment pour effet de compromettre l'avenir de nombreuses espèces : hippocampes, requins, rhinocéros, tigres…

avant tout idéologiques : la bureaucratie cherchait à se débarrasser du fatras de conceptions religieuses, cosmologiques et thérapeutiques convoyé par la médecine traditionnelle. Ses éléments pertinents devaient petit à petit recevoir des explications modernes, donc fondées sur la médecine occidentale…

La visite du président américain Richard Nixon en 1972 et l'ouverture de la Chine qui s'ensuivit sous la direction de Deng Xiaoping compliquèrent la situation d'une façon que les planificateurs n'avaient pas… planifiée : les récits disponibles en Occident sur les mystérieux succès de l'acupuncture attirèrent en Chine un flot de médecins, de guérisseurs, de politiciens et de particuliers intéressés…

Très vite, des livres sur la médecine alternative venue d'Extrême-Orient parurent en Occident, et furent de grands succès. Pour beaucoup de lecteurs, la tradition chinoise représentait enfin le contrepoint si longtemps attendu à la médecine occidentale fondée sur la technique et la chimie. Mais ces ouvrages étaient écrits par des auteurs connaissant mal la langue et la médecine chinoises, autant d'« experts » qui n'avaient pas eu l'occasion non plus d'observer la véritable pratique clinique chinoise. Il est clair que le cadre limité de leurs brèves rencontres avec des informateurs chinois ne pouvait qu'amplifier leur tendance à projeter leurs attentes sur la TCM , cette médecine « traditionnelle » d'essence bureaucratique. C'est pourquoi ils se persuadèrent de son origine multimillénaire, et pensèrent avoir enfin trouvé la médecine douce, naturelle et holistique (s'adressant à la personne dans sa globalité) qu'ils attendaient.

Donnant d'innombrables conférences, ces auteurs ont diffusé dans les années 1970 et 1980 la vision qu'ils s'étaient forgée de la TCM. On ne peut que s'étonner de la façon dont se sont comportées tant de personnes issues de sociétés où s'étaient propagées les Lumières… Malgré leur formation aux sciences naturelles et à la logique dans les universités occidentales, elles se firent abuser par de grossiers graphiques montrant les transformations dans la théorie cosmologique des Cinq Phases ou du Yin-yang, qu'elles prirent pour l'expression d'une très ancienne sagesse extrême-orientale.

Quand on lit aujourd'hui leurs écrits, on ressent qu'ils avaient surtout pour fonction de calmer la nostalgie d'un passé idéalisé. Alors que la peur de la guerre froide et d'un conflit nucléaire s'estompait, on était à l'époque du Club de Rome, ce cercle de réflexion à l'origine de tant de prévisions inquiétantes pour le futur de l'humanité. Des peurs existentielles – embargo sur le pétrole, transition énergétique, pollution de l'environnement, disparition des espèces, changement climatique, affaiblissement des relations humaines – s'emparaient des gens et les troublaient.

Cette peur généralisée déclencha aussi un changement sociétal, fit apparaître de nouveaux partis, et comme cela s'était déjà produit dans l'histoire de la médecine, changea aussi la relation de chacun avec son corps. Dans ce contexte, la véritable nature de la TCM ne comptait guère : moins on avait de connaissances historiques sur sa nature, plus il devenait facile de projeter sur le papier des espoirs de guérison. Les partisans occidentaux de la « médecine traditionnelle chinoise » combattaient d'ailleurs les indices historiques n'allant pas dans leur sens par des polémiques agressives et en omettant certains faits.

Dès lors, ils n'eurent pas la possibilité de se confronter humblement et sérieusement à l'histoire de la médecine chinoise. Quant à l'attitude consistant à repérer les idées et les pratiques traditionnelles efficaces pour les combiner avec les secteurs correspondants de la médecine occidentale, elle leur déplaisait. Pour eux, la « médecine traditionnelle chinoise » convoyait une vision du monde qu'il importait de bien séparer de celle qui sous-tend la médecine scientifique. Et c'est exactement à ce niveau que les politiques chinois intervinrent, d'une part, en Chine et, d'autre part, à l'étranger.

L'engouement occidental, une aubaine commerciale

D'abord étonnés que l'Occident attache tant d'intérêt à ce dont ils voulaient se débarrasser le plus vite possible, les dirigeants chinois prirent ensuite conscience des perspectives exportatrices considérables qu'ouvrait ce phénomène aux produits pharmaceutiques chinois. Les universités où l'on enseignait la TCM se mirent alors à gagner beaucoup d'argent en vendant des cours très simplifiés à des Occidentaux pleins de confiance. Mais dans le même temps, les dirigeants chinois s'étaient aussi mis à craindre cet enthousiasme occidental vis-à-vis de l'idée que la TCM puisse être une alternative sérieuse à la médecine moderne.

On peut les comprendre : il y a un siècle seulement, le tiers de l'humanité que représente la Chine était encore le jouet des puissances occidentales. Pendant que l'on s'y complaisait encore dans les théories des Cinq phases et du Yin-yang, cet immense pays était humilié, même par le minuscule Japon… Or les théories des Cinq Phases et du Yin-yang ne permettent ni de faire sonner un téléphone ni d'allumer une

© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013

ampoule électrique, sans parler de tirer un missile… et là-dessus, tous les dirigeants chinois s'entendaient.

Que de jeunes Occidentaux sensibles et intelligents se détournent des sciences de la nature pour suivre la tradition chinoise et ne deviennent ni des Einstein ni des Bill Gates, cela ne pouvait les gêner. En revanche, que dans leur pays aussi, de plus en plus de voix s'élèvent pour exiger un retour aux vieux concepts leur paraissait menaçant. Rien d'étonnant au fait que dans le cadre du combat des civilisations, ils y aient vu un possible nouvel affaiblissement de la Chine.

Pourquoi la République populaire de Chine lance-t-elle en Occident des campagnes pour y améliorer la position de la TCM ? Pour des raisons commerciales ! Comme dans d'autres secteurs économiques, la Chine désire abattre les barrières limitant ses exportations. Ses efforts tendent aussi à faire passer à l'Ouest l'interprétation moderne de la médecine chinoise élaborée en Chine. Dans cette conception, la TCM est une partie de la médecine moderne, qui a aussi des fondements dans les sciences biologiques et moléculaires. Les bureaucrates estiment qu'en maintenant fermement ce point de vue, on évitera que l'espoir répandu en Occident de trouver dans la « médecine traditionnelle chinoise » une alternative à la médecine moderne… ne passe en Chine et ne s'y propage !

Des enjeux culturels, politiques, commerciaux

C'est dans ce contexte que la Chine a activement participé à l'organisation d'un grand congrès de l'Organisation mondiale de la santé à Pékin en 2008. Cet événement visait à situer dans un cadre clair l'emploi des médecines traditionnelles et est à l'origine de la déclaration dite de Pékin, qui appelait à développer un usage plus fréquent de la « médecine traditionnelle » et son intégration aux autres formes de traitement. Le congrès de Pékin a été suivi d'un congrès sino-européen sur la médecine traditionnelle chinoise à Bologne en 2012, dans le même esprit.

Au premier regard, il semble absurde que les Chinois soulignent que la TCM est une composante importante de la culture chinoise, qui ne peut être enseignée qu'en Chine et par des Chinois, puisqu'on pourrait prétendre alors la même chose de cette émanation de la culture européenne qu'est la médecine moderne.

Derrière cette affirmation chinoise se cache en réalité une peur de perdre le contrôle de l'avenir. L'Occident réagit en effet de façon très diverse à la TCM : les groupes qui voient dans la « médecine traditionnelle chinoise » une alternative à la médecine moderne font face à d'autres, où l'on essaie de mener des recherches sur l'efficacité de l'acupuncture et de la pharmacie traditionnelle chinoise.

La question de l'absurdité ou au contraire du sens de la TCM est un sujet complexe, tant sur le plan culturel que sociopsychologique. Elle n'est pas qu'une question médicale ; elle relève aussi de la vision que l'on a du monde et d'enjeux politiques et commerciaux dans le secteur de la santé. Pour cette raison, il est probable que la TCM ne pourra pas être étudiée de façon raisonnable avant longtemps. ■



Les données du télescope spatial *Planck* sur le fond diffus cosmologique, le rayonnement le plus ancien de l'Univers, confirment les hypothèses principales du modèle du Big Bang avec une précision notablement supérieure à celle des expériences précédentes.

Alain Riazuelo

Planck géomètre

Les photons qui se propagent dans l'espace sont des témoins du passé, notamment de l'Univers primordial et des conditions qui y ont régné. Il est possible d'observer le rayonnement qui a été émis par l'Univers âgé de 370 000 ans, alors qu'il était plus dense et plus chaud, donc très lumineux. Comme l'Univers est en expansion, cette lueur émise il y a plus de 13 milliards d'années s'est diluée et refroidie au cours du temps sans disparaître pour autant. Elle existe encore aujourd'hui, sous la forme d'un rayonnement froid et uniforme : le fond diffus cosmologique, écho du Big Bang et vestige de l'époque la plus violente de l'histoire de l'Univers.

Le télescope spatial européen *Planck* avait pour mission d'étudier le rayonnement de ce fond diffus cosmologique et d'en établir une carte avec une résolution jamais atteinte auparavant *(voir la figure 1)*. En mars 2013, l'équipe qui analyse les données recueillies par le télescope a publié un nombre important de résultats. Les données de *Planck* ont précisé les prévisions du modèle du Big Bang et permettent de tester certains scénarios décrivant les phénomènes qui ont pu se produire dans les premiers instants de l'Univers. Mais elles ont aussi réservé quelques surprises aux cosmologistes, confirmant que le modèle de l'Univers primordial n'est pas encore définitif.

Le fond diffus cosmologique fut prédit en 1948 par l'astrophysicien américain Ralph Alpher et ses collègues. Il fut découvert en 1964 par les radioastronomes Arno Penzias et Robert Wilson, qui s'intéressaient à l'émission radio de la Voie lactée. Lors de leurs observations, ils enregistrèrent fortuitement un signal venant de toutes les directions : la première photographie de l'Univers primordial. Cette observation est l'une des plus importantes confirmations des prévisions du modèle du Big Bang.

Rappelons que, dans le modèle du Big Bang, le fond diffus cosmologique résulte d'une étape importante qui s'est déroulée environ 370 000 ans après la naissance de l'Univers. Ce dernier était alors empli d'un plasma complètement ionisé et les électrons libres diffusaient la lumière prisonnière de ce plasma. Avec le refroidissement de l'Univers, les électrons libres se sont associés aux noyaux atomiques pour former les premiers atomes. À ce moment, nommé recombinaison, l'Univers est devenu transparent. Le fond diffus, libéré de l'emprise de la matière, a pu s'échapper, et nous parvenir sans guère subir d'altérations autres que son refroidissement.

Les mesures rudimentaires de Penzias et Wilson ne permettaient pas de déterminer avec précision l'homogénéité du rayonnement. Les prévisions théoriques supposaient que le fond diffus cosmologique présentait de faibles fluctuations de la température indiquée par les photons. Ces fluctuations étaient dues aux conditions physiques qui régnaient dans l'Univers lors de la recombinaison. Les cosmologistes se sont donc intéressés à l'étude de ces fluctuations pour récolter de nombreux indices sur l'Univers primordial.

Mesurer les fluctuations

La mission *Planck* se situe dans la continuité d'un ensemble d'expériences sur l'étude des fluctuations du fond diffus et améliore la précision des mesures. Après un retour sur les missions spatiales qui ont étudié ce rayonnement, nous rappellerons l'origine des fluctuations et comment le satellite *Planck* mesure ces hétérogénéités. En analysant les données, les cosmologistes obtiennent de nombreux résultats : ils mesurent avec précision les paramètres du modèle standard de la cosmologie, ce qui leur permet d'exclure certains scénarios proposés à la place de ce modèle. Dans la dernière partie, nous verrons que les résultats de *Planck*

© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013



de l'Univers primordial

soulèvent quelques questions, qui restent ouvertes pour le moment.

Le défi de la mesure des fluctuations fut relevé en premier, à partir de 1989, par le satellite américain COBE. Les chercheurs annoncèrent la première détection des fluctuations cosmologiques du fond diffus en 1992. Deux missions ont suivi, une américaine, WMAP, et une européenne, *Planck*. De surcroît, de nombreuses expériences au sol ou embarquées à bord de ballons stratosphériques virent le jour. Lancé en 2001, le satellite WMAP avait pu être mis au point dans des délais assez brefs pour une mission spatiale, car il utilisait des techniques déjà disponibles. Deux années plus tard, il livra la première carte complète du ciel à haute résolution, permettant un gain remarquable par rapport à son prédécesseur COBE *(voir la figure 4)*. Le 14 mai 2009, *Planck* était mis en orbite avec la mission de réaliser une carte encore plus précise des fluctuations de température du fond diffus *(voir la figure 3)*.

Nous l'avons évoqué, ces fluctuations sont liées aux conditions qui régnaient dans l'Univers lors de la recombinaison. Pour comprendre leur origine et comment elles permettent de déterminer les grandeurs physiques qui caractérisent l'Univers primordial, rappelons le scénario

L'ESSENTIEL

- Le satellite *Planck* a enregistré les fluctuations de température dans le rayonnement du fond diffus cosmologique.
- L'analyse de ces fluctuations permet d'estimer avec précision la densité en matière ordinaire, en matière noire et en énergie sombre de l'Univers.
- Les données confirment certaines hypothèses du modèle du Big Bang, telle l'inflation, mais présentent quelques anomalies que les cosmologistes devront expliquer.

général de leur apparition. Dans l'Univers primordial, la matière n'est pas répartie de façon homogène. Des zones légèrement plus denses existaient déjà et ont servi d'amorce pour la formation des galaxies et amas de galaxies observés aujourd'hui. Dans le plasma de l'Univers primordial, les hétérogénéités sont surtout présentes dans la matière noire – une composante importante de l'Univers dont la nature et la détection directe font l'objet de nombreuses recherches. La matière ordinaire – le plasma d'ions et d'électrons – était, à cette époque, plus uniforme. Les zones denses en matière noire ont attiré la matière ordinaire par des effets gravitationnels, mais le rayonnement qui baignait le plasma et la pression de radiation qu'il exerçait s'opposaient à la chute de matière ordinaire vers les zones où la matière noire était concentrée. Cela a provoqué un mouvement oscillant de la matière ordinaire, et fait apparaître des ondes de densité *(voir la figure 2)*. Tout s'est passé comme si l'Univers primordial avait été parcouru d'immenses vibrations. Lors

1. LE SATELLITE *PLANCK* a enregistré le rayonnement du fond diffus cosmologique. Sur cette vue d'artiste, on distingue les miroirs et le détecteur *(à droite)*, et le module de service avec les panneaux solaires *(à gauche)*.

de la recombinaison, les photons se sont échappés du plasma après avoir enregistré une image de la distribution de la matière ordinaire. La température associée aux photons dépend de la densité de matière de la région où ils ont été émis : supérieure dans les zones plus denses, inférieure dans les zones moins denses. Les variations de températures enregistrées par le satellite *Planck* représentent précisément les fluctuations de la densité de matière de l'Univers primordial. Elles sont de l'ordre de 10^{-5} kelvin par rapport à la température moyenne des photons qui est d'environ 2,7 kelvins (–270,5 °C).

Notons que la démarche des cosmologistes rappelle celle des astrophysiciens qui utilisent l'héliosismologie, l'analyse des vibrations détectées à la surface du Soleil, pour sonder la structure interne de l'astre. De même, les données de *Planck*, les fluctuations de température, sont reliées aux vibrations de la matière lors de la recombinaison.

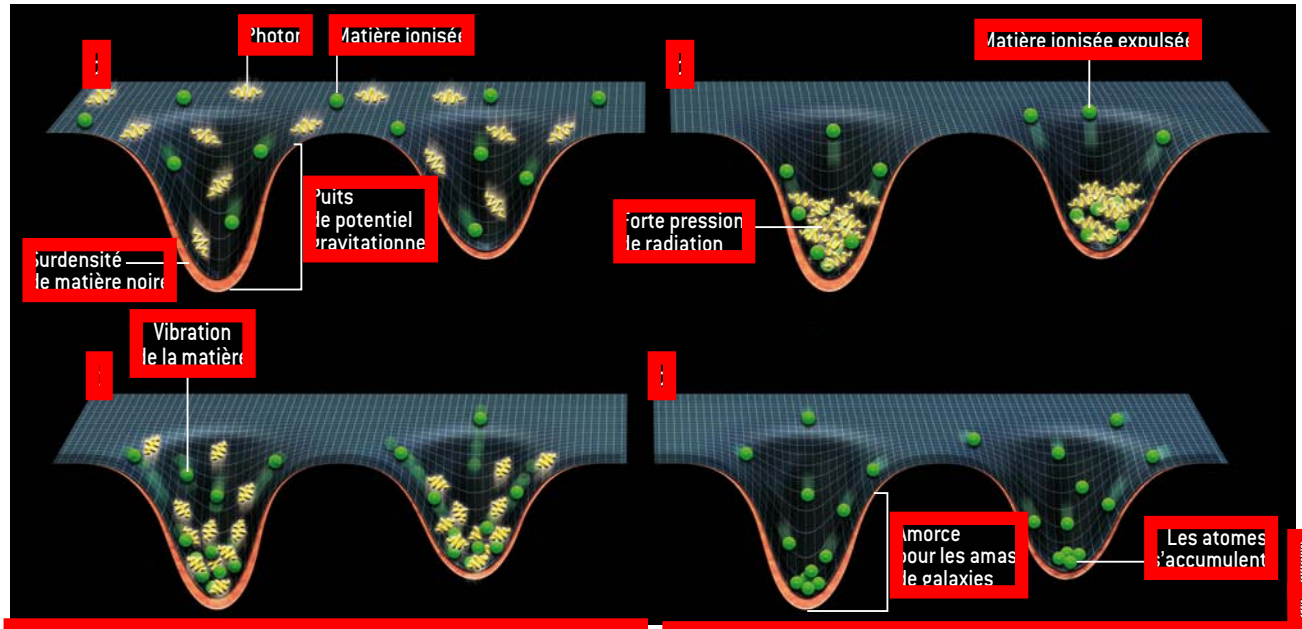
Si les approches dans ces deux domaines présentent des similarités, le traitement des données est très différent. Le satellite *Planck* est équipé d'un détecteur refroidi *(voir la figure 5)* à une fraction de kelvin, qui enregistre le rayonnement venant de l'espace à différentes fréquences. Le signal est ensuite traité pour isoler les fluctuations du fond diffus cosmologique *(voir l'encadré page 50)* et éliminer le rayonnement parasite provenant, par exemple, de la poussière interstellaire. À partir de la carte des fluctuations *(voir la figure 3)*, les cosmologistes effectuent une analyse statistique *(voir l'encadré page 49)* pour déterminer les propriétés des vibrations de la matière lors de la recombinaison. Les chercheurs en tirent alors les grandeurs physiques qui régnaient dans l'Univers primordial.

Six ingrédients pour décrire le modèle

Dans le modèle standard de la cosmologie, un petit nombre de paramètres suffit pour interpréter les résultats de *Planck*. Il s'agit des grandeurs physiques liées aux vibrations de la matière et à la propagation des photons du fond diffus. Certains paramètres sont bien connus grâce aux expériences précédentes ou d'après des arguments théoriques : la densité de photons et de neutrinos dans l'Univers primordial et la courbure de l'espace. Les autres paramètres ont été estimés auparavant, mais sont entachés d'incertitudes. Les résultats de *Planck* permettent d'évaluer, avec une bonne précision, ces six ingrédients : la densité de matière ordinaire, la densité de matière noire, la densité d'énergie sombre, la date de la réionisation et deux paramètres qui caractérisent les fluctuations de densité de la matière noire.

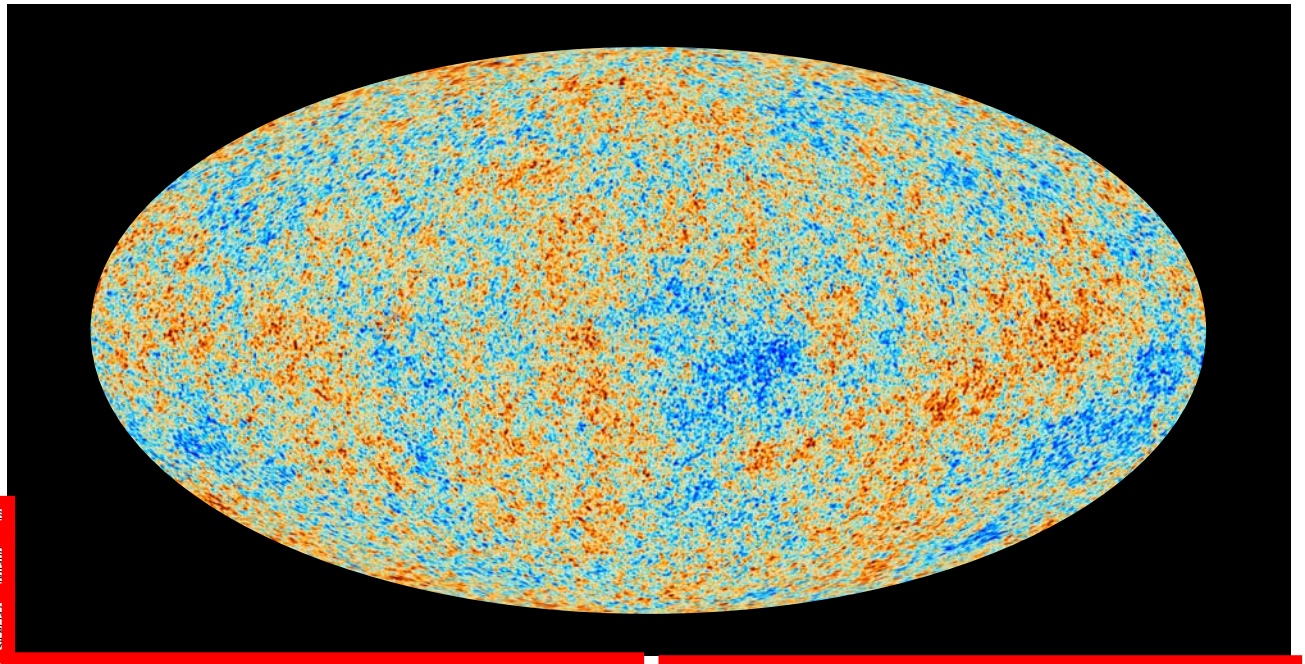
Les deux premiers ingrédients sont les densités de matière ordinaire et de matière noire dans l'Univers primordial. Le premier influe notablement sur l'amplitude des vibrations de la matière. Les données de *Planck* permettent d'estimer sa valeur, environ 0,249 proton par mètre cube, avec une précision de l'ordre de deux pour cent. La densité de la matière noire est moins bien connue, car son impact sur la carte du fond diffus est moindre. La précision sur la valeur de sa densité est de quatre pour cent.

Le rôle de l'énergie sombre – une composante hypothétique qui explique que l'expansion de l'Univers s'accélère – diffère. L'énergie sombre intervient dans l'estimation de la distance apparente séparant la région d'émission du fond diffus cosmologique et le satellite. En effet, pour analyser les vibrations du plasma, il faut connaître la distance maximale parcourue par les ondes de vibration. Or la carte des fluctuations ne livre qu'une information sur la taille angulaire de ces ondes. Du fait de son action sur la dynamique d'expansion de l'Univers, la densité d'énergie sombre



2. DANS L'UNIVERS PRIMORDIAL, l'interaction de la matière noire avec la matière ordinaire, alors sous forme d'ions et d'électrons *(en vert)*, et les photons *(en jaune)* impose les propriétés du rayonnement du fond diffus cosmologique. Le plasma est homogène tandis que la matière noire présente des régions de surdensité *(en orange dans les puits de potentiel gravitationnel)*. Ces régions attirent le plasma *(a)*. Le surplus de photons crée une pression qui fait vibrer la matière ordinaire *(b)*. Les oscillations de la matière ordinaire redistribuent la matière *(c)*. Lors de la recombinaison, les photons s'échappent en enregistrant un instantané des vibrations du plasma. Ensuite, la matière ordinaire s'accumule à nouveau dans les régions riches en matière noire *(d)* qui deviendront les amas de galaxies.

© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013



3. LA CARTE DES FLUCTUATIONS DE TEMPÉRATURE obtenue par *Planck* montre les variations par rapport à la valeur moyenne du rayonnement du fond diffus cosmologique, qui est d'environ 2,7 kelvins. Ces fluctuations sont de l'ordre de 10^{-5} kelvin. Par rapport à cette moyenne, certaines zones sont plus chaudes *(en orange)* d'autres plus froides *(en bleu)*. Si l'ensemble est assez homogène, on constate pourtant que de vastes régions sont globalement plus chaudes ou plus froides. C'est le cas, par exemple, de la tache bleue en bas à droite. Ces taches sont liées à un événement très ancien de l'histoire de l'Univers.

intervient dans le calcul de la distance apparente de la région d'émission du fond diffus, ce qui influe sur la position des pics dans le spectre dit de puissance *(voir l'encadré page 49)*. Ce dernier représente l'amplitude des ondes en fonction de leur diamètre angulaire. Des trois densités, celle de l'énergie sombre est la moins bien estimée par les données de *Planck*, son incertitude étant de cinq pour cent.

Rapportés à la densité totale de l'Univers, l'énergie sombre contribue pour 69,3 pour cent, tandis que la matière noire et la matière ordinaire représentent 25,9 et 4,8 pour cent.

Le quatrième ingrédient est de nature astrophysique, il s'agit de la date de la réionisation. Quelques centaines de millions d'années après la recombinaison, les premières étoiles ont commencé à se former. Très chaudes, elles ont provoqué une ionisation importante et rapide de la matière, un phénomène confirmé par certaines observations astrophysiques. L'Univers est redevenu légèrement opaque, ce qui crée un léger flou sur la carte du fond diffus. Nous ne savons pas déterminer le moment précis de formation des premières étoiles, ce qui nous empêche de déterminer la date de la réionisation. On la considère donc comme un paramètre libre qui est déterminé à partir de l'analyse de la carte du fond diffus. On estime ainsi la date de réionisation à 409 millions d'années avec une incertitude de 25 pour cent.

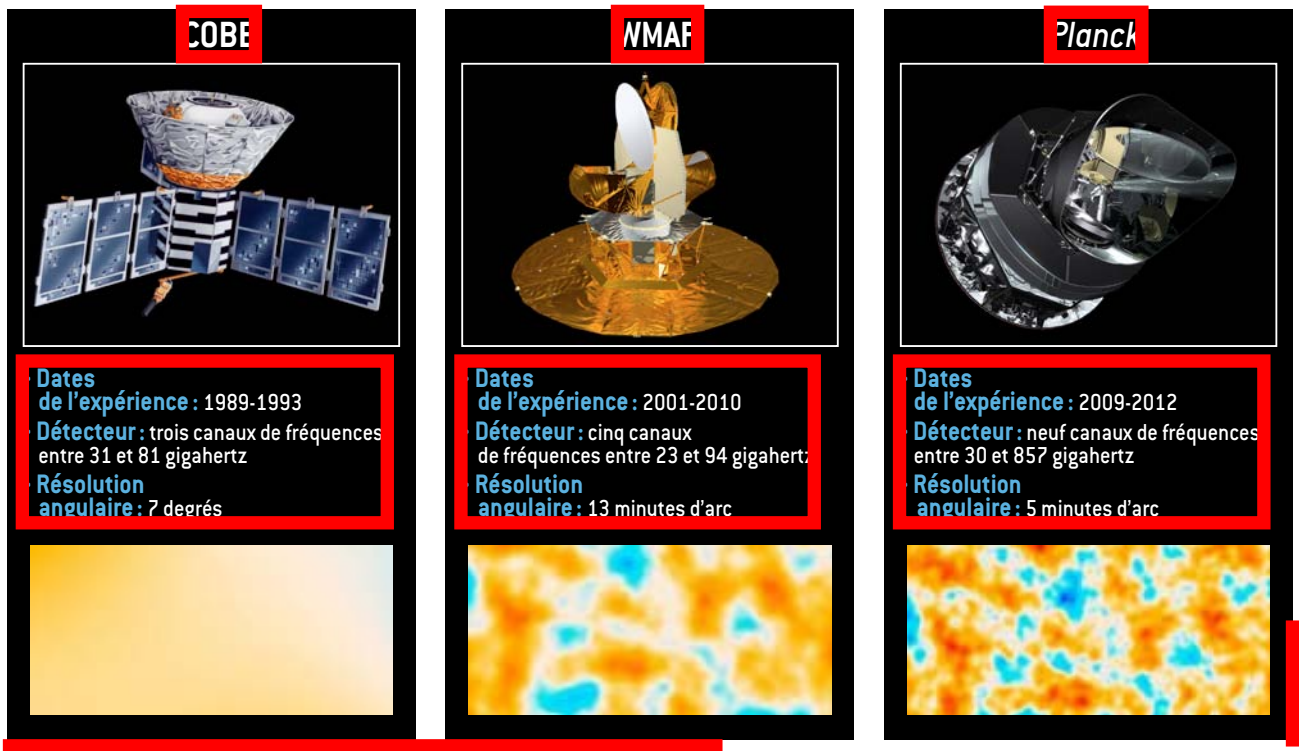
Enfin, à ces inconnues, il faut ajouter une description de la distribution de la matière telle qu'elle existait dans l'Univers primordial. Comme nous ne connaissons pas avec certitude le mécanisme qui a créé ces fluctuations, d'où sont issues les régions de surdensité de matière noire, la description des fluctuations de densité est statistique. En d'autres termes, il faut décrire l'amplitude initiale des fluctuations en fonction de leur taille. Pour cela, deux paramètres sont nécessaires : l'amplitude à une échelle de taille donnée, et la façon dont cette amplitude varie avec l'échelle.

L'un des principaux résultats de *Planck* concerne la description du processus responsable des fluctuations de densité. En effet, les mesures permettent de bien caractériser les fluctuations de densité et de comparer leurs propriétés aux prévisions des modèles théoriques développés par les cosmologistes. Parmi tous les scénarios, le plus étudié est celui de l'inflation cosmique. Selon ce scénario, l'Univers a connu une phase d'expansion rapide au tout début de son existence. Les distances ont été multipliées par un facteur 10^{25} en une fraction de seconde. Ce mécanisme a été

L'AUTEUR



Alain RIAZUELO est chargé de recherche CNRS à l'Institut d'astrophysique de Paris et membre de l'équipe *Planck* HFI.



4. TROIS SATELLITES ont étudié le rayonnement du fond diffus cosmologique

proposé pour expliquer pourquoi l'Univers est globalement le même dans toutes les directions. Sinon, comment expliquer que deux régions de la carte du fond diffus, si éloignées l'une de l'autre qu'elles n'ont jamais pu être en contact dans l'Univers primordial, présentent la même température moyenne de 2,7 kelvins ? Ce scénario assure que ces régions ont été en contact (car initialement très proches) et que les conditions qui y régnaient se sont équilibrées avant le début de l'inflation.

Quel est le rapport avec les fluctuations de densité ? La réponse tient à ce que les relations d'incertitude du monde microscopique se trouvent, elles aussi, largement amplifiées par le même phénomène. Elles donnent naissance aux fluctuations de densité de l'Univers primordial. Mais au-delà du rôle *ad hoc* de l'inflation, on peut tester concrètement la pertinence de ces idées.

L'inflation se confirme

L'inflation autorise en effet plusieurs prévisions robustes, indépendantes du détail de son déroulement. Tout d'abord, l'Univers doit être plat (sans courbure intrinsèque), ce que confirment les mesures de *Planck*. Par ailleurs, l'inflation prévoit, au moins pour ses versions les plus simples, plusieurs propriétés statistiques des fluctuations. Elles doivent être presque « invariantes d'échelle » : leur amplitude dépend peu de l'échelle à laquelle on les étudie, et, à une échelle donnée, la répartition des amplitudes suit une distribution gaussienne. Suggérés par les expériences passées, ces résultats sont confirmés par *Planck*. Ils permettent d'écarter des modèles d'inflation plus complexes qui prévoyaient des distributions non gaussiennes et des scénarios non fondés sur l'inflation, tel le scénario ekpyrotique, un modèle cyclique de l'Univers.

Ainsi, le satellite *Planck* a permis d'évaluer avec précision les paramètres du modèle standard de la cosmologie qui rendent compte de l'Univers primordial, apportant de nouvelles confirmations du modèle standard de la cosmologie. Pourrait-on utiliser les données de *Planck* pour invalider certains modèles alternatifs ? Comme nous l'avons évoqué pour l'inflation, les données du satellite permettent de tester des scénarios alternatifs et d'exclure ceux qui ne sont pas compatibles avec les résultats.

Par exemple, une question débattue depuis plus de dix ans est la suivante : les constantes fondamentales changent-elles au cours du temps ? Certains modèles supposent que la constante de structure fine, qui régit l'intensité de la force électromagnétique, varie avec le temps. En intervenant dans le processus de diffusion des photons sur les

BIBLIOGRAPHIE

Collaboration *Planck*, **Planck 2013 results. I. Overview of products and scientific results**, soumis à *Astronomy & Astrophysics*, 2013.

Collaboration *Planck*, **Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters**, soumis à *Astronomy & Astrophysics*, 2013.

Collaboration *Planck*, **Planck 2013 results. XVII. Gravitational lensing by large-scale structure**, soumis à *Astronomy & Astrophysics*, 2013.

Collaboration *Planck*, **Planck 2013 results. XXIV. Constraints on primordial non-Gaussianity**, soumis à *Astronomy & Astrophysics*, 2013.

Collaboration *Planck*, **Planck 2013 results. XXVI. Background geometry and topology of the Universe**, soumis à *Astronomy & Astrophysics*, 2013.

© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013

électrons du plasma, la valeur de la constante influe sur le fond diffus cosmologique. Les résultats de *Planck* montrent que ce paramètre ne varie pas, dans la limite de précision de l'expérience. De même, parmi les nombreux modèles d'énergie sombre développés par les cosmologistes, certains supposent que cette composante hypothétique de l'Univers a des propriétés qui évoluent avec le temps. Si les données de *Planck* peuvent difficilement préciser les caractéristiques de l'énergie sombre, elles n'indiquent pas que l'énergie sombre varie au cours du temps.

Dans un autre domaine, lié à la physique des particules, les données de *Planck* permettent de tester le nombre de familles de neutrinos. Initialement, ce nombre est fixé à trois comme dans le modèle standard de la physique des particules. Mais certaines expériences qui étudient l'oscillation des neutrinos – la transformation périodique d'un neutrino d'une famille en un représentant d'une autre famille – présentent des anomalies. Celles-ci suggèrent l'existence possible d'une quatrième famille de neutrinos, nommés neutrinos stériles, car ces particules interagissent avec d'autres particules uniquement *via* les oscillations. Une famille supplémentaire de neutrinos aurait eu une influence sur les fluctuations du fond diffus, mais ce type de modification n'est pas observé dans les résultats. Il n'y aurait bien que trois familles de neutrinos.

Que dire sur la forme globale de l'Univers ? L'expérience WMAP avait déjà montré qu'à grande échelle, l'Univers a une géométrie euclidienne ou plate. Cela signifie que les règles usuelles de la géométrie s'appliquent à l'Univers : la somme des angles d'un triangle est égale à 180 degrés ou encore deux droites parallèles ne se croisent jamais. On écarte ainsi des géométries sphériques ou hyperboliques. Les observations de *Planck* confirment

À ÉCOUTER

Le jeudi 2 mai 2013 de 14h à 15h, Alain Riazuelo reviendra sur les résultats de *Planck* dans la partie Actualités de l'émission **La marche des sciences**, sur *France Culture*. www.franceculture.com

Des fluctuations de température aux grandeurs physiques

La carte du fond diffus cosmologique représente les fluctuations de température des photons autour de la valeur moyenne de 2,7 kelvins *(voir la figure 3)*. Ces variations de température donnent un aperçu de la distribution de la matière au moment de la recombinaison, lorsque les ions et les électrons ont formé les atomes neutres. Les structures observées résultent de l'évolution des fluctuations de densité primordiales issues d'un processus aléatoire plus ancien, qui pourrait être l'inflation.

Pour exploiter cette carte, les cosmologistes vont dans un premier temps reconstituer les propriétés statistiques des structures observées, essentiellement en effectuant une décomposition par échelle et en déterminant pour chacune d'entre elles l'amplitude typique des écarts à la moyenne des fluctuations.

Ce principe d'analyse est très utilisé en traitement du signal, qu'il soit sonore ou électrique. Par exemple, un signal sinusoïdal est caractérisé par la fréquence des oscillations et l'amplitude du signal. Pour un signal quelconque, il est possible de le décomposer comme une somme infinie de sinusoïdes, chacune avec sa fréquence et son amplitude (décomposition de Fourier). Le signal est décrit par l'ensemble des amplitudes et des fréquences, ce qui en facilite l'analyse.

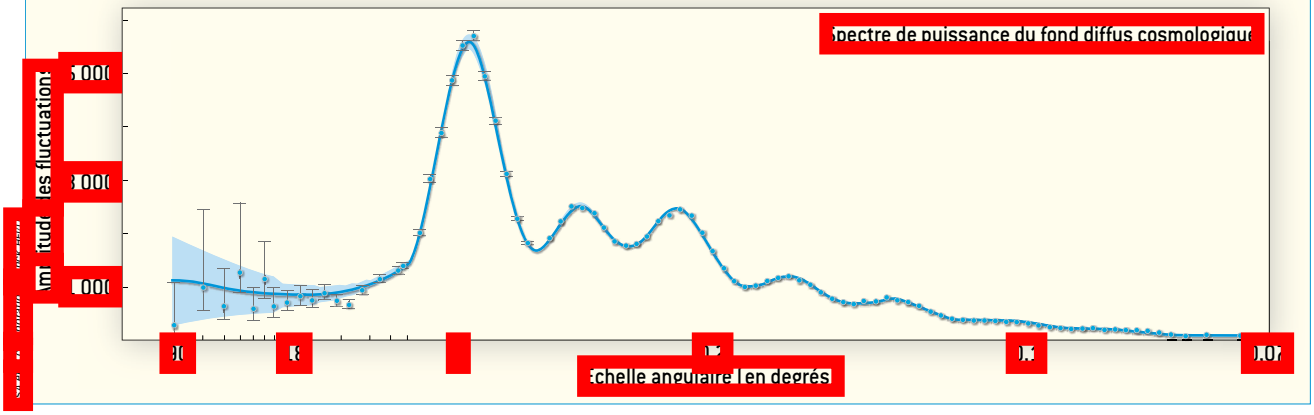
Dans le cas du fond diffus, il s'agit d'un signal en deux dimensions – celles de la carte – et il correspond à l'enchevêtrement d'ondes tridimensionnelles, les vibrations de la matière ordinaire dans le plasma. Il existe des outils mathématiques adaptés à cette situation, équivalente à la décomposition en une somme infinie de sinusoïdes.

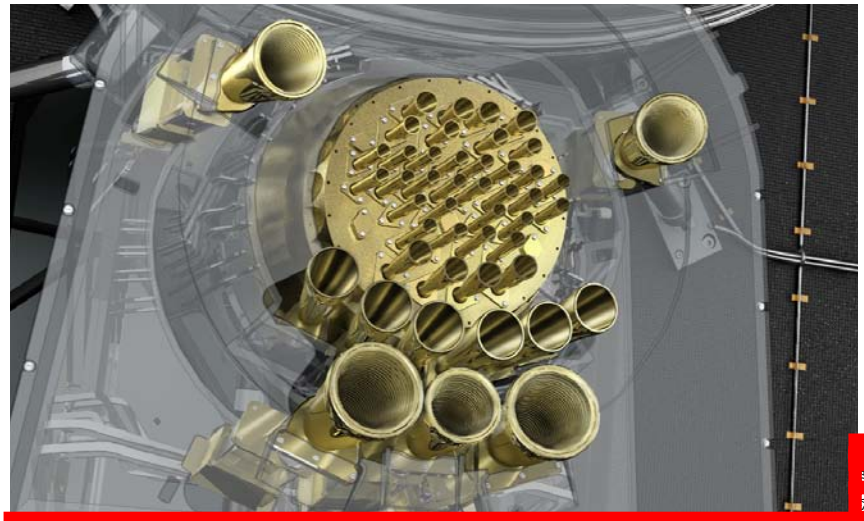
Ce traitement produit le spectre de puissance *(voir la figure)* qui représente les amplitudes de chaque terme de la décomposition en fonction de l'échelle. Les termes à gauche correspondent à des structures de grande taille dans le ciel, tandis que celles qui sont à droite sont les structures les plus petites. On remarque que ces incertitudes sur les données de *Planck (points bleus)*, à l'exception des premiers points *(à gauche)*, sont très petites, signe de la grande précision des mesures du satellite.

Les cosmologistes confrontent ces données aux spectres théoriques prévus par les différents modèles qu'ils ont imaginés.

En pratique, un modèle donné dépend d'un certain nombre de paramètres, que l'on fait varier afin de déterminer la combinaison qui s'ajuste le mieux aux données. Si le jeu de paramètres est satisfaisant, il permet de donner les valeurs de ces paramètres.

La courbe *(en bleu)* sur le spectre correspond au choix de paramètres qui restitue au mieux les résultats expérimentaux. On obtient ainsi les valeurs de la densité de matière noire, de matière ordinaire, de rayonnement,





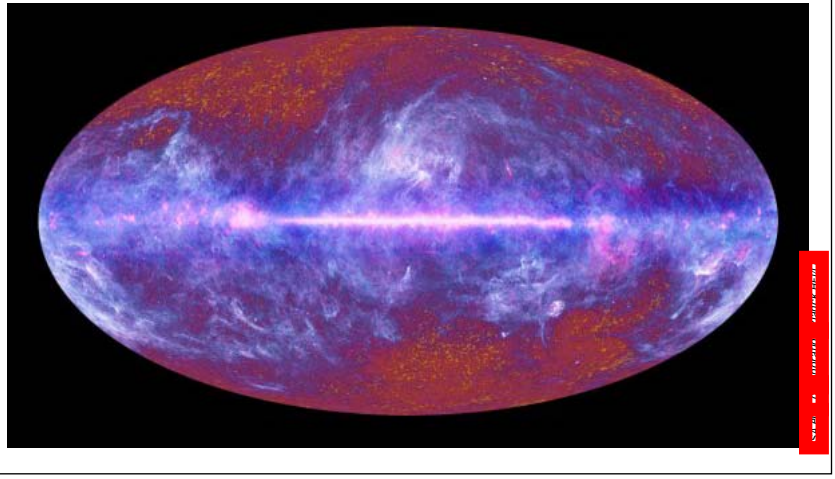
5. LE DÉTECTEUR DE *PLANCK* est composé de neuf groupes de cornets, chaque groupe étant sensible à une fréquence du rayonnement.

LE FOND DIFFUS CACHE DERRIÈRE LES AVANT-PLANS

L'observation du fond diffus cosmologique n'est pas directe. Il faut soustraire les effets cinématiques du déplacement combiné de la Terre, du Soleil et de la galaxie par rapport à l'Univers lointain. À cause de l'effet Doppler, les photons provenant d'une direction – celle du mouvement – sont plus « chauds » que ceux de la direction opposée. Ce phénomène a été observé pour la première fois en 1971.

Après avoir soustrait cet effet cinématique, les cosmologistes doivent éliminer certains rayonnements enregistrés par les détecteurs de *Planck* qui se superposent au fond diffus. Ces rayonnements perturbateurs proviennent de processus astrophysiques d'avant-plan. Ces sources émettent de la lumière dans la même gamme de longueurs d'onde que le fond diffus. Ce rayonnement a diverses origines : il provient de l'émission galactique, de la poussière interstellaire, du rayonnement d'électrons diffusés sur des particules chargées, ou du rayonnement synchrotron émis par une particule chargée et déviée par un champ magnétique. La carte ci-dessous montre l'effet d'un type d'avant-plan sur la carte du fond. On distingue très nettement la Voie lactée d'où est émis le rayonnement parasite.

Aux fréquences comprises entre 100 et 217 gigahertz, les fluctuations du fond diffus cosmologique dominent tous les avant-plans. Mais pour extraire au mieux la contribution qui intéresse les cosmologistes, il est nécessaire d'observer une plus vaste gamme de fréquences. Le détecteur de *Planck* est sensible à des fréquences comprises entre 30 et 857 gigahertz. Cela permet de mieux modéliser le rayonnement des particules chargées à basse fréquence et la lumière émise par la poussière à haute fréquence. Il est alors possible de nettoyer les cartes de rayonnement enregistrées entre 100 et 217 gigahertz. Le processus d'obtention de la carte du fond diffus est très complexe et nécessite le travail d'une grande équipe de physiciens pour démêler tous les signaux.



ce résultat et étendent son domaine de validité à des distances allant jusqu'à 660 milliards d'années-lumière, soit 15 fois le rayon de l'Univers observable.

Si l'Univers est plat, il n'est pas forcément infini. Il peut être replié sur lui-même, un peu à l'image d'une pièce dont les murs, le sol et le plafond seraient tapissés de miroirs : même finie, la pièce donnerait l'impression d'un espace infini à quiconque s'y trouverait. Le jeu des réflexions donne une infinité d'images de chaque objet que contient la pièce. La même chose se produit-elle pour l'Univers, est-il « chiffonné » selon l'expression de l'astrophysicien Jean-Pierre Luminet ? On ne trouve pas de trace d'images multiples du fond diffus, ce qui limite les possibilités que l'Univers soit replié sur lui-même.

Et, fini ou pas, l'Univers tourne-t-il sur lui-même ? Là encore, une rotation globale de l'Univers serait observable par le biais d'une série de motifs en spirale que l'on devrait observer dans des directions opposées, spirales dont la structure serait déterminée par les abondances de matière et d'énergie sombre. Là encore, l'analyse ne révèle rien qui serait compatible avec une telle rotation, pas plus qu'on ne trouve la trace de cordes cosmiques, sortes d'immenses concentrations filiformes d'énergie dont la formation est jugée possible à l'issue de l'inflation.

Des surprises dans les données

Le rôle de la mission *Planck* n'a pas été seulement d'améliorer la précision sur certaines grandeurs physiques. Il a permis de tester des modèles différents et d'écarter ceux dont les prévisions ne sont pas observées. Cependant, l'analyse réserve aussi quelques surprises dont il est difficile aujourd'hui de savoir qu'en penser. Par exemple, quand on examine le spectre de puissance *(voir l'encadré page 49)*, on constate des anomalies. Les points pour les échelles angulaires les plus grandes sont presque tous situés au-dessous de la courbe, alors qu'on se serait attendu à ce qu'ils soient équitablement répartis de part et d'autre de celle-ci. Pour quelle raison ? On l'ignore. L'hypothèse la plus prudente serait d'imaginer un problème dans le traitement des données brutes, mais aucune explication n'a été trouvée jusqu'à maintenant. Du reste, cet effet est aussi visible dans les données, certes moins précises, de WMAP. Cela tend sans doute à rendre son

© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013

existence plus plausible ; ce ne serait pas un artefact lié au traitement de données.

Une autre observation inexpliquée de WMAP qui se confirme est la présence d'une tache froide dans la carte des fluctuations de température. Elle est située en bas à droite de la carte *(voir la figure 3)*.

Autre surprise, la valeur de la constante de Hubble, qui indique la vitesse d'expansion de l'Univers, obtenue par l'équipe de *Planck* est plus basse, 67,8 kilomètres par seconde et par mégaparsec, mais néanmoins compatible avec celles déduites d'à peu près toutes les autres observations. Quand on combine les données de *Planck* à ces valeurs plus élevées de la constante de Hubble, on obtient des résultats étranges. Par exemple, les propriétés de l'énergie sombre suggèrent que sa densité augmente avec le temps, contrairement à l'analyse avec les données de *Planck* seul. Autrement dit, l'expansion de l'Univers accélérerait de plus en plus et précipiterait l'Univers vers une fin cataclysmique… La confiance à accorder à ce résultat reste à évaluer. En tout état de cause, la précision des données de *Planck* est précieuse : en poussant à l'extrême les prévisions des modèles, il n'est pas exclu que l'on se rende compte que ceux-ci sont incomplets ou que certaines observations sont moins précises qu'on ne le pensait, voire entachées d'erreurs. Le temps nous dira laquelle de ces deux hypothèses est correcte.

Si les données de *Planck* présentent des écarts avec certaines observations, d'autres tests confirment les résultats de *Planck*. Par exemple, la nucléosynthèse primordiale décrit la production d'hydrogène et d'hélium dans l'Univers primordial. L'étude du fond diffus permet de calculer les concentrations de ces éléments, avec des résultats compatibles avec les observations.

La polarisation : des résultats à venir

Par ailleurs, la distribution de matière dans l'Univers influe sur la carte des fluctuations. En effet, la lumière du fond diffus est déviée de sa trajectoire lorsqu'elle passe à proximité d'une grande densité de matière, à cause des effets de courbure de l'espace suivant les lois de la relativité générale. Il est possible de déduire de cette carte la distribution de la matière. Or cette distribution est compatible avec des analyses indépendantes de la distribution de matière dans l'Univers.

Les résultats impressionnants de *Planck* ne sont que le premier volet de cette mission. Ils seront encore précisés, en particulier ceux sur l'inflation, par des mesures de polarisation du fond diffus. Lors de la recombinaison, la lumière du fond diffus a acquis une polarisation électromagnétique. Ce phénomène permet notamment de préciser l'époque de la réionisation et l'amplitude des déformations produites par les effets de lentille gravitationnelle.

Un certain type de polarisation pourrait révéler que la naissance des fluctuations de densité que nous observons a été accompagnée de celle d'ondes gravitationnelles, sorte de rides de l'espace-temps se propageant au sein de celui-ci à la vitesse de la lumière. Ces ondes gravitationnelles, dont il n'est malheureusement pas possible de prédire l'amplitude, seraient un test pour l'inflation. La suite de l'analyse des données par l'équipe de *Planck* pourrait ainsi mettre un point final au modèle de l'inflation. ■





Du béton FLEXIBLE

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé des sociétés modernes. Au cours des XIXe et XXe siècles, son usage s'est répandu pour nombre d'infrastructures : bâtiments, routes, barrages... La quantité de béton produite en 2012 est estimée à 12 milliards de tonnes, soit deux tonnes par an et par être humain. La plus haute construction (828 mètres) et le plus long pont (165 kilomètres) du monde, respectivement la tour Burj Khalifa, à Dubaï, et le pont reliant Danyang et Kunshan, en Chine, sont en béton.

Constitué de granulats (sable, graviers) maintenus par un liant, l'usage du béton s'est répandu après l'invention du ciment dit de Portland (en raison de sa couleur similaire à la roche de Portland, qui a notamment servi à la construction du palais de Buckingham) par le maçon britannique Joseph Aspdin en 1824. Ce ciment est le liant le plus utilisé aujourd'hui. Sa fabrication, donc celle du béton, consomme beaucoup d'énergie. On confectionne le ciment en broyant du calcaire (qui contient du calcium) et de l'argile (renfermant de la silice), puis en chauffant la poudre résultante à une température comprise entre 1 400 °C et 1 600 °C. Les grains résultants, nommés clinker, sont ensuite broyés et mélangés avec d'autres éléments en plus faible proportion. Le ciment de Portland contient deux types de silicate de calcium, l'alite $(CaO)_3(SiO_2)$ et le belite Ca_2SiO_4, qui assurent respectivement la résistance du béton dès le début du durcissement et sa longévité.

Pour obtenir le béton, on mélange le ciment avec les granulats, puis on ajoute

L'ESSENTIEL

- Un type de béton à la fois flexible et résistant a été élaboré.
- Ces propriétés sont obtenues en contrôlant la taille des imperfections dans le béton et en renforçant ce dernier par des fibres spéciales.
- Ce béton flexible a été utilisé pour diverses infrastructures, tels des bâtiments et des ponts.

© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013

de l'eau. L'hydratation (les réactions chimiques avec l'eau) entraîne la formation d'un matériau qui durcit, même dans un environnement humide.

Le béton a connu de fréquentes améliorations. En 1867, Joseph Monier, en France, l'a renforcé avec des barres d'acier : c'est le principe du béton armé. Sa résistance à la compression a été augmentée. D'autres innovations ont amélioré sa qualité et la rapidité de sa mise en place, tout en diminuant le besoin de main-d'œuvre : ainsi, le béton dit autoplaçant, créé dans les années 1990, ne nécessite pas de phase de compactage et d'évacuation des poches d'air après la pose. Depuis peu, on incorpore souvent aux bétons certains sous-produits industriels, tels des cendres issues de centrales à charbon ou des résidus minéraux de la production d'acier.

Pourtant, le béton a encore d'importantes limitations. C'est un matériau cassant, qui résiste bien à la compression, mais mal à la traction. Bien que les structures en béton ne soient habituellement pas prévues pour être étirées, elles subissent tout de même des forces de traction lorsqu'elles sont fléchies, cisaillées (c'est-à-dire soumises à une force parallèle à leur surface), ou légèrement déformées (par exemple quand elles se contractent en séchant). Soumis à ces forces, le matériau devient brusquement moins résistant – voire se brise – dès qu'une fissure se propage.

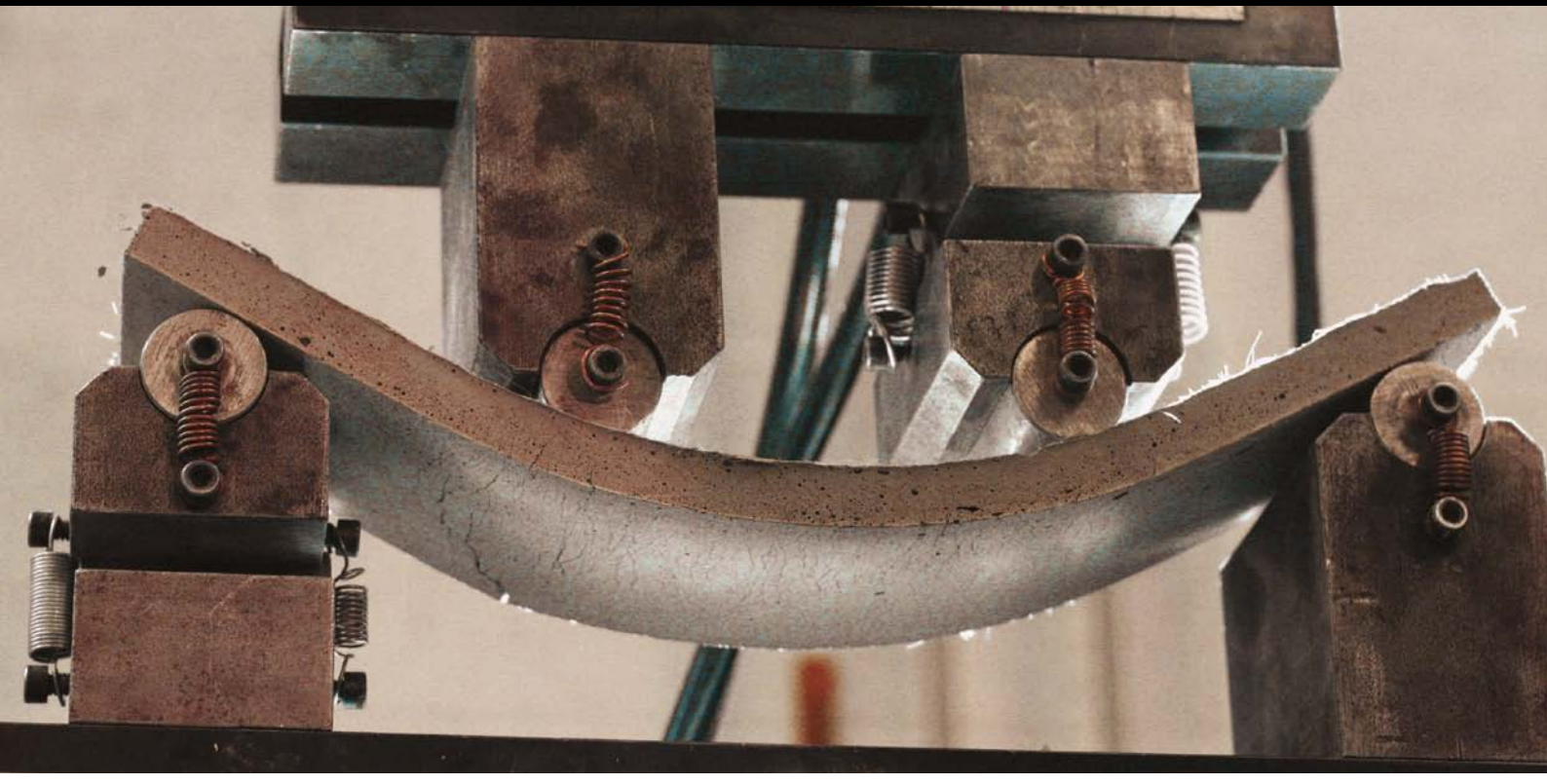
Certaines techniques permettent de surmonter ces limitations, telle l'addition de renforts en acier. Malgré tout, les structures en béton restent fragiles et connaissent parfois des ruptures catastrophiques, notamment lors de tremblements de terre. Celui qui a frappé la province chinoise du Sichuan, en 2008, a provoqué l'effondrement de nombreuses structures en béton et la mort de 69 000 personnes. En 2011, suite au tremblement de terre et du tsunami qui ont touché le Japon, une fissure longue de 20 centimètres a percé une structure en béton de la centrale nucléaire de Fukushima, entraînant une fuite d'eau radioactive dans l'océan Pacifique.

Outre des ruptures catastrophiques, les infrastructures en béton subissent aussi des détériorations sous des conditions normales, avec des conséquences économiques, sociales et environnementales. La fragilité du matériau contraint à combler sans cesse les fractures, une pratique peu écologique. Aux États-Unis, on estime à près de 1 700 milliards d'euros les investissements nécessaires à la

1. LE BETON EST UN MATERIAU CASSANT, et c'est pourquoi les tremblements de terre ont des effets dévastateurs sur les infrastructures *(page ci-contre)*. On cherche à le rendre plus flexible, pour qu'il plie sans se rompre lors de sollicitations extrêmes *(ci-dessous, un test sur un béton flexible nommé ECC)*.

Victor L

Les infrastructures en béton se détériorent vite et sont vulnérables aux tremblements de terre. Pour y remédier, les ingénieurs développent des bétons flexibles.



rénovation des infrastructures civiles, et à 4,2 milliards d'heures par an le temps perdu par les automobilistes dans les bouchons – souvent liés aux travaux de réfection des routes. À l'échelle de la planète, la fabrication du ciment nécessaire au béton est responsable de cinq pour cent des émissions humaines de dioxyde de carbone et contribue donc notablement au réchauffement climatique.

Aux origines de la fragilité

Ainsi, malgré les nombreux progrès, la fragilité du béton demeure problématique. Elle compromet la sécurité, la durabilité et la pérennité économique de son exploitation. La question suivante se pose alors : le béton peut-il être rendu ductile plutôt que fragile ? En d'autres termes, peut-on élaborer un béton qui, soumis à une contrainte trop intense, se déformerait sans se rompre ?

Avant d'y répondre, examinons pourquoi le béton est cassant. Lorsqu'une force s'applique sur la structure, les fissures se développent à partir de défauts préexistants. Les défauts du béton sont variés. Certains sont des irrégularités à l'interface des granulats et du ciment, zone plus poreuse et plus riche en cristaux d'hydroxyde de calcium fragiles que le cœur du ciment lui-même. Les défauts peuvent aussi être des bulles d'air ou de petites fissures préexistantes liées par exemple au vieillissement des grains, qui rétrécissent et provoquent un réarrangement du réseau).

Comme il n'existe dans le béton aucun mécanisme de dissipation de l'énergie différent de la propagation de fissures, ces dernières deviennent instables, se transforment en fractures béantes et dégradent les propriétés mécaniques du matériau. L'acier, en revanche, présente un mécanisme alternatif de dissipation : des dislocations (d'infimes irrégularités du réseau cristallin) se propagent grâce à un réarrangement des liaisons atomiques et entraînent une déformation du matériau. En conséquence, la résistance de l'acier est supérieure de plusieurs ordres de grandeur à celle du béton. Même quand une fissure se crée à partir d'un défaut dans l'acier, les mouvements des dislocations alentour l'empêchent souvent de se propager. C'est l'absence d'un mécanisme de ce type dans le béton qui le rend cassant, un peu comme du verre.

Au cours des dernières décennies, de nombreux travaux visant à rendre le béton plus résistant ont consisté à réduire les défauts préexistants. En diminuant la

ÉTIRER LE MATÉRIAU POUR DÉTERMINER SES PROPRIÉTÉS

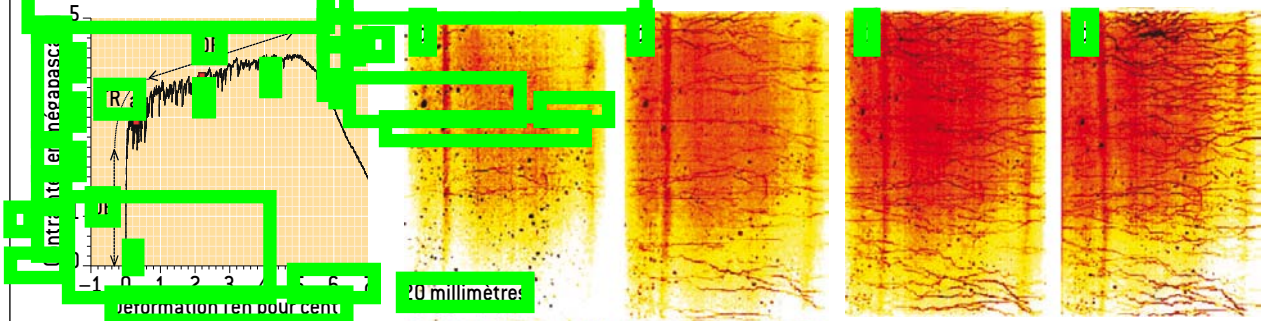
Pour caractériser les propriétés mécaniques d'un matériau, on en étire un échantillon jusqu'à la rupture grâce à une machine. On trace ensuite la courbe de traction *(ci-dessous, à gauche)*, qui représente la contrainte supportée (la force par unité de surface) et l'allongement correspondant (en pour cent de la longueur totale). Cette courbe est indépendante des dimensions de l'échantillon.

Celle de l'ECC, le béton flexible élaboré par l'équipe de l'auteur, présente trois régimes principaux : la déformation élastique (DE), le régime de transition (TR) et la déformation plastique (DP). Durant le premier, le matériau retrouve sa forme quand on supprime la force de traction. Ainsi, l'ECC peut se déformer de 0,01 pour cent sans conséquence à long terme. Dans le régime de transition, la rigidité (égale à la pente de la courbe de traction, et qui caractérise donc le supplément de force à appliquer pour augmenter la déformation) diminue progressivement. Dans le régime de déformation plastique, le matériau s'allonge de façon inélastique, c'est-à-dire permanente ; la rigidité, faible, reste constante et la dureté augmente.

Dans ces deux derniers régimes, la courbe présente de multiples soubresauts, dus à l'ouverture de microfissures. Celles-ci permettent au matériau de dissiper l'énergie de traction.

Quand la force et l'allongement dépassent les limites du régime de déformation plastique (environ deux à cinq pour cent de déformation selon la version de l'ECC), une ou plusieurs fractures importantes s'ouvrent, d'où une perte de capacité de charge : une force qui s'applique sur le matériau, même plus faible qu'auparavant, le déforme beaucoup, voire le brise. La première fissure n'est pas nécessairement celle qui cause la rupture finale. Les photographies en fausses couleurs de l'échantillon d'ECC *(ci-dessous)* montrent la fissuration pour les différents régimes (les points correspondants sont représentés sur la courbe de traction).

Un béton ordinaire, même renforcé par des fibres, ne présente qu'un seul régime, celui de déformation élastique. Au-delà, il casse directement. Cela se produit à environ 0,01 pour cent de déformation. L'ECC, qui peut s'allonger jusqu'à deux à cinq pour cent sans se briser grâce au régime de déformation plastique, a donc une capacité de déformation supérieure de deux ordres de grandeur. C'est l'origine de sa résistance.



LA COURBE DE TRACTION D'UN MATÉRIAU relie la force qui lui est appliquée à la déformation engendrée. Celle de l'ECC *(à gauche)* présente trois régimes : la déformation élastique (DE), le régime de transition (TR) et la déformation plastique (DP). À mesure que la force et la déformation augmentent, des microfissures s'ouvrent dans le matériau *(à droite, pour différents points de la courbe)*. Au-delà du régime de déformation plastique, certaines fissures finissent par s'élargir au point que le matériau devient incapable de supporter des forces intenses sans se déformer notablement, voire se briser.

© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013

taille des granulats, on diminue aussi celle des défauts qui naissent à l'interface avec le ciment. De façon alternative, on rend cette interface plus dense et plus résistante en ajoutant au béton des microparticules d'oxyde de silice, 100 fois plus petites que les grains du ciment Portland ; ces particules influent aussi favorablement sur la chimie à l'œuvre à l'échelle nanométrique. Les défauts du ciment peuvent également être minimisés en compactant la poudre, en diminuant la quantité d'eau à laquelle on la mélange (afin de réduire la taille des pores qui se forment pendant le durcissement du matériau), ou en éliminant les bulles d'air piégées lors de l'application du béton, par exemple grâce à des additifs chimiques.

Du béton cassant au béton ductile

Bien que de telles techniques augmentent la résistance aux forces de traction et de compression en retardant le déclenchement de fissures, le matériau demeure cassant, et le devient même souvent encore plus. En effet, quand une fissure finit par se propager, une quantité d'énergie supérieure a été accumulée par le matériau et se libère brutalement. Limiter les défauts au lieu d'introduire des mécanismes de dissipation de l'énergie conduit donc à un béton plus résistant (une force supérieure est nécessaire pour le détériorer), mais aussi plus cassant (les détériorations se traduisent plus vite par une rupture totale).

Incorporer au béton un réseau de fibres d'acier, de verre ou de polymère augmente notablement sa résistance. En effet, les fibres accroissent la dissipation d'énergie, notamment par la rupture de liaisons chimiques à leur surface et par le frottement créé lorsqu'elles glissent dans le matériau. Quand elle se produit, la rupture est plus progressive et qualifiée de quasi fragile : le béton peut encore supporter une certaine charge après l'ouverture d'une fissure, tandis qu'en l'absence de fibres, il se brise rapidement. Cependant, les mécanismes de dissipation n'agissent que sur une petite zone proche de l'extrémité de la fissure qui se propage, et le renfort fibré ne fait que réduire la fragilité du béton sans l'éliminer. Jusqu'à récemment, un béton ductile semblait impossible à réaliser.

C'est pourtant ce que nous avons accompli durant les deux dernières décennies à l'Université du Michigan. Le béton ductile que nous avons développé est nommé ECC (pour *Engineered Cementitious Composite*, c'est-à-dire composite cimentaire conçu par ingénierie). Il se fonde à la fois sur un renfort fibré et sur un contrôle de la taille des défauts. Nous décrirons d'abord ses caractéristiques macroscopiques, avant de détailler les mécanismes mésoscopiques et microscopiques sous-jacents.

Il ne s'agissait pas de rendre le béton aussi flexible que le caoutchouc – ce ne serait plus un bon matériau de construction. Un béton ductile doit être aussi rigide que du béton normal dans les conditions habituelles, mais fléchir et se déformer sans se casser lors de sollicitations extrêmes.

Tous les matériaux ont une limite dite élastique, au-delà de laquelle ils encourent des dommages irréversibles. Lorsque les forces appliquées excèdent cette limite, les matériaux ductiles subissent une déformation « inélastique » (qualifiée de plastique), c'est-à-dire permanente, mais ils ne se brisent pas. Ces matériaux sont donc très résistants. Lorsqu'une force localement très intense s'exerce sur un matériau ductile, elle est redistribuée dans le volume adjacent grâce à l'ouverture de multiples microfissures *(voir la figure 3)* ; la propagation d'une fissure majeure susceptible de fracturer le matériau est ainsi évitée.

En laboratoire, la ductilité est quantifiée en utilisant des barreaux, souvent plats, du matériau à caractériser. Des pinces hydrauliques maintiennent les extrémités du barreau, qui est étiré jusqu'à la rupture. On mesure alors son étirement maximal, grâce auquel on quantifie la ductilité du matériau. On trace également une courbe de traction, liant la déformation et la contrainte (la force de traction par unité de surface). Cette courbe caractérise le comportement mécanique du matériau.

Une déformation plus de 100 fois supérieure à celle du béton ordinaire

Elle montre que le béton ECC s'étire de façon réversible jusqu'à 0,01 pour cent, puis de façon irréversible (mais sans se rompre) jusqu'à 2 à 5 pour cent *(voir l'encadré page ci-contre)*. Le béton ordinaire, lui, se déforme jusqu'à 0,01 pour cent, puis se brise. La capacité de déformation de l'ECC est donc plus de 100 fois supérieure à celle

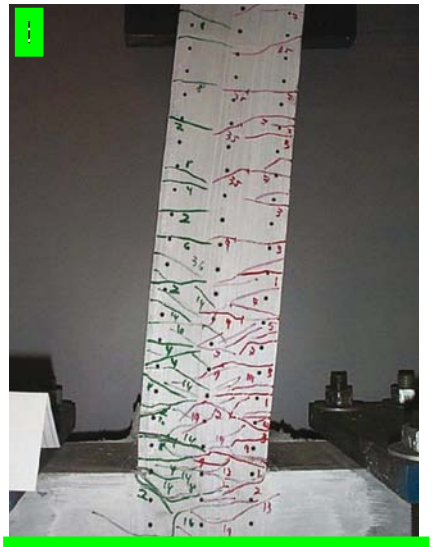
L'AUTEUR



Victor LI est professeur de génie civil et environnemental, ainsi que de science et génie des matériaux, à l'Université du Michigan, aux États-Unis.

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





2. QUAND ON SECOUE une colonne de béton armé classique pour simuler un tremblement de terre, elle se détériore notablement *(a)*. En revanche, une colonne de béton flexible ECC se fissure davantage *(b, lignes marquées en rouge et vert)*, mais résiste bien mieux.

du béton ordinaire : c'est le béton le plus ductile en usage aujourd'hui.

La déformation irréversible de l'ECC est associée à l'ouverture de nombreuses microfissures presque parallèles entre elles, et perpendiculaires à la force de traction. Elles se développent à partir d'un ensemble de défauts préexistants dans le matériau. Leur ouverture contrôlée est la source de la ductilité en traction de l'ECC. Elles permettent au matériau de dissiper une quantité croissante d'énergie lorsque la force de traction augmente. Le même principe est appliqué à la carrosserie des voitures, qui se déforme lors d'un accident pour dissiper l'énergie du choc.

Un béton ultrarésistant grâce aux microfissures

Les microfissures naissent d'abord à partir des plus grands défauts préexistants, puis des plus petits. En conséquence, leur ouverture est de plus en plus difficile, et la force nécessaire pour déformer le matériau augmente à mesure que cette déformation progresse. Si les défauts du béton étaient de taille uniforme, la courbe de traction serait une succession de deux droites, la seconde étant horizontale : au-delà de la limite élastique, la déformation se poursuivrait même si l'on n'augmentait pas la contrainte appliquée.

À mesure que les microfissures se développent, la distance qui les sépare diminue, jusqu'à ce qu'un état de saturation soit atteint : leur espacement est alors d'environ un millimètre. La largeur de la microfissure augmente d'abord de façon quasi linéaire avec la contrainte, puis se stabilise, en général au-dessous de 100 micromètres – nous avons pu abaisser cette valeur, qui dépend de la composition de l'ECC, jusqu'à 20 micromètres. Une microfissure ne dégénère pas en fracture majeure avant que la limite de déformation du matériau ne soit atteinte.

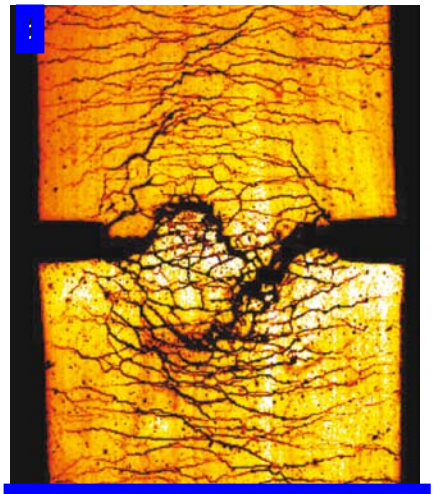
Quand il finit par se rompre, un barreau d'ECC présente donc tout un réseau de microfissures – à l'inverse d'un matériau fragile ou quasi fragile, dont la rupture est nette et localisée. Les microfissures atteignent parfois le bord du barreau, même s'il est de grande taille (36 centimètres de longueur, 30 centimètres de largeur et 6 centimètres d'épaisseur). La traction maximale que peut subir le barreau est déterminée par les microfissures les moins résistantes – par exemple celles ayant la plus faible densité de fibres de renfort.

La capacité de l'ECC à dissiper l'énergie par l'ouverture de microfissures le rend particulièrement résistant aux entailles. C'est ce qu'illustrent des tests de traction effectués avec des barreaux préentaillés *(voir la figure 3)*.

Un intervalle optimal pour la taille des défauts

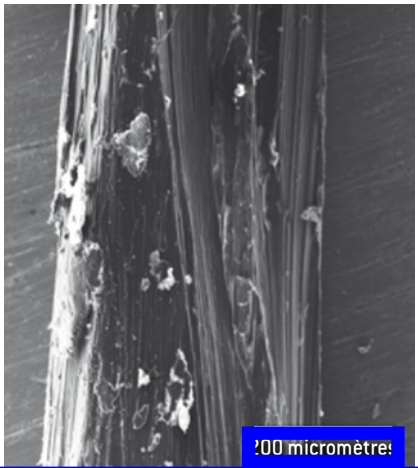
Puisque les microfissures naissent de défauts préexistants dans le matériau, il est crucial de contrôler la taille de ces défauts. Ils ne doivent pas être trop petits, sinon





3. LES ENTAILLES FRAGILISENT un béton classique, car des fissures risquent de se propager depuis leur pointe et de conduire à la rupture. Dans le béton flexible ECC, l'énergie est mieux répartie dans le matériau et se dissipe par l'ouverture de microfissures sur une vaste zone *(a, cas d'une entaille simple, et b, cas d'une entaille double)*. En conséquence, tandis qu'un béton classique entaillé devient brutalement plus fragile, la diminution de résistance est plus progressive pour le béton ECC.





4. LE BÉTON FLEXIBLE ECC contient des fibres de polymère, qui établissent des ponts entre les bords des microfissures et empêchent ces dernières de trop s'élargir *(à gauche ; l'image couvre un champ de cinq millimètres)*. Les fibres, qui s'abrasent en glissant dans la matrice de ciment, sont de plus en plus liées à cette matrice à mesure que la fissure s'ouvre, car leur adhérence augmente *(à droite, une fibre après le glissement)*. Dès lors, à partir d'une certaine ouverture, les forces qui s'exercent sur le matériau entraînent plutôt l'ouverture de nouvelles microfissures que l'élargissement des fissures existantes.

© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013

Un béton « à la carte » ?

Le béton flexible ECC appartient au groupe des matériaux composites dits organiques-inorganiques. Dans de tels matériaux, un composé organique (comprenant du carbone), ici le polymère, coexiste avec un composé inorganique (qui contient par exemple de la silice, du calcium, etc.). Les molécules de polymère peuvent être rassemblées en fibres, comme dans l'ECC, ou dispersées dans l'hydrate cimentaire. Les propriétés de ces matériaux composites (qualité de l'hydratation, fluidité lors de la phase liquide, résistance, etc.) sont directement liées aux propriétés chimiques de l'interface des deux composés et à la nature de leurs interactions.

Les bétons « autoplaçants », par exemple, sont très liquides et leur prise est relativement lente. La pose en est facilitée, car le béton se coule à l'emplacement souhaité et aucune phase d'homogénéisation ultérieure n'est nécessaire. Ces propriétés résultent de l'addition de molécules de polymères, qui enveloppent les grains de ciment et retardent leur hydratation, tout en facilitant leurs mouvements.

Ce sont aussi les polymères qui permettent de réaliser des bétons autoréparants (ou autocicatrisants). Cela n'est pas spécifique au béton ECC et est déjà opérationnel à l'échelle industrielle. Lors de la pose, l'eau est ajoutée au ciment en quantité insuffisante pour faire réagir tous les grains de clinker (le principal composant), de sorte que certains restent protégés par leur film polymérique ; quand une fracture se produit, ils deviennent accessibles à l'eau (de pluie, par exemple), qui provoque une nouvelle formation d'hydrate cimentaire, et donc l'autoréparation.

Malgré leur importance, les interactions des composés organiques et inorganiques dans ces matériaux sont mal connues. Dans le cas du béton ECC, l'augmentation d'adhérence des fibres à mesure qu'on les retire de la matrice semble due aux copeaux abrasés, qui restent attachés aux fibres et se prennent dans les porosités du ciment, mais d'autres mécanismes sont sans doute à l'œuvre : formation de nouvelles liaisons chimiques, interactions électrostatiques, etc.

Une approche physico-chimique moderne, combinant des analyses à toutes les échelles (du nanoscopique au macroscopique) permettrait de préciser ces interactions, ainsi que les paramètres clefs. On pourrait alors envisager une ingénierie « à la carte » du béton, où l'on obtiendrait les propriétés souhaitées en faisant varier divers paramètres, telle la nature du polymère.

Roland Pellenq,
directeur de l'Unité mixte internationale CNRS-MIT *Multi-scale material science for energy and environment* (MSE), à Cambridge, aux États-Unis

l'ouverture de microfissures est trop difficile. La force nécessaire pour les ouvrir étant très élevée, elle déclencherait une rupture majeure. L'idée de défauts « pas trop petits » dans l'ECC contraste avec les principes des bétons de hautes performances, où l'on cherche à minimiser la taille des défauts, voire à les éliminer.

Ainsi, lorsque la distribution naturelle de tailles d'imperfections n'est pas optimale pour la microfissuration, l'introduction de défauts artificiels est bénéfique. Nous avons appliqué cette idée à une version d'ECC développée pour effectuer des réparations rapides (le matériau sèche vite) : de petites particules de polystyrène, d'un diamètre maximal d'environ quatre millimètres, ont été ajoutées au mélange. Ces défauts artificiels augmentent la ductilité du composite. Sans eux, le matériau se comporterait comme un béton doté d'un renfort fibré ordinaire. Dans l'ECC, le contrôle de la distribution statistique de la taille des défauts permet donc d'adapter le comportement mécanique.

Ces défauts ne doivent être ni trop petits, ni trop grands. S'ils ont une taille excessive, les microfissures se forment trop vite, et la résistance à la traction et à la compression diminue. Il existe donc un intervalle optimal pour la taille des défauts.

Outre cette taille, les fibres de renfort sont le second élément clef de l'ECC, car elles évitent que les microfissures s'agrandissent démesurément. Lorsqu'une microfissure s'ouvre, les fibres forment une « couture » entre les deux bords et supportent une grande partie des forces exercées sur le matériau *(voir la figure 4)*. Souvent polymérisées à partir d'alcool polyvinylique (APV), elles sont de faible diamètre (environ 39 micromètres), afin qu'on puisse en mettre un grand nombre. Chaque centimètre carré d'ECC contient ainsi plus de 1 000 fibres.

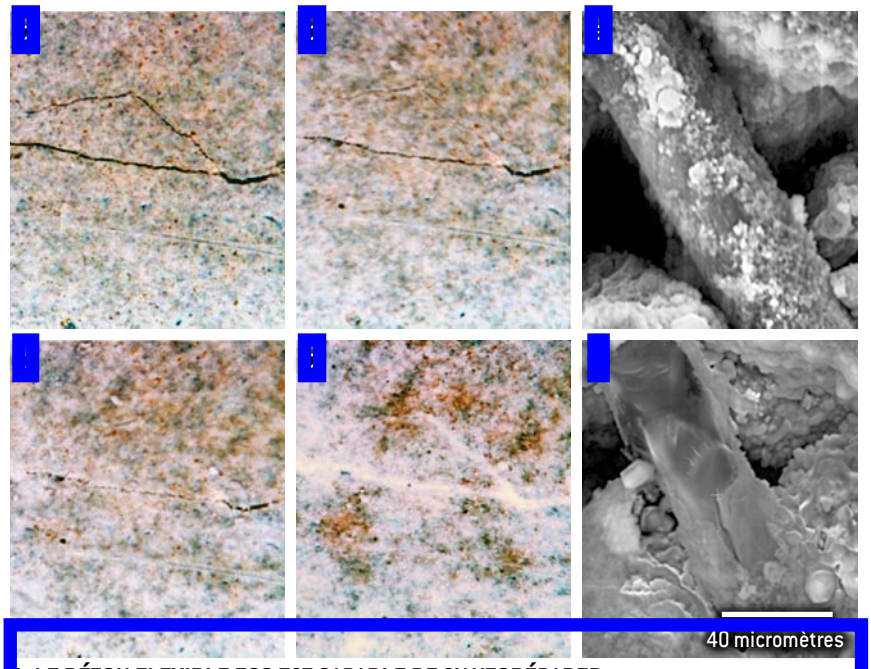
De l'importance des fibres

En conséquence, les microfissures se propagent sans s'élargir (seule la largeur de la petite zone où s'ouvre la fissure augmente brièvement). On parle de propagation plate, un mode distinct de la propagation dite de Griffith, plus commune, où l'ouverture maximale de la fissure augmente comme la racine carrée de sa longueur. Comme les fibres relient les bords d'une fissure qui vient de s'ouvrir, une force supplémentaire peut s'exercer sur le matériau sans le briser : au lieu d'élargir la fissure, elle déclenche l'ouverture de nouvelles microfissures à partir d'autres défauts. En d'autres termes, les fibres entraînent un type particulier d'ouverture des microfissures à l'échelle mésoscopique, ce qui joue un rôle majeur dans le comportement mécanique de l'ECC.



5. LA TOUR RESIDENTIELLE *Nabeaure Yokohama*, située à Tokyo et achevée en 2007, comporte 41 étages. À chaque étage, quatre poutres de liaison en ECC *(en jaune sur le schéma)* relient les murs de la structure interne *(en vert)*. Capables de se déformer et d'absorber ainsi l'énergie reçue des tremblements de terre, elles stabilisent le bâtiment.

© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013



5. LE BÉTON FLEXIBLE ECC EST CAPABLE DE S'AUTORÉPARER, comme l'indiquent les photographies *a* à *d*, qui montrent l'évolution d'une fissure au cours du temps. Les photographies au microscope *(e, f)* présentent les bords de la fissure et la fibre juste après la fissuration *(e)* et après 36 heures d'immersion dans l'eau *(f)* : divers composés solides se sont formés et ont comblé la fissure.

La résistance et la densité des fibres déterminent la force maximale au-delà de laquelle une microfissure dégénérera en fracture du matériau. La dispersion des fibres dans le composite étant imparfaite, leur densité varie légèrement. Finalement, l'ECC se brise lorsque la force limite d'une des microfissures est dépassée.

Les interactions fibres-microfissures sont complexes, en particulier lorsque les fibres traversent les fissures selon un angle incliné – ce qui se produit la plupart du temps, car elles sont orientées aléatoirement dans la matrice de ciment hydraté. Pour obtenir les propriétés mécaniques souhaitées, chaque fibre doit se décoller de la matrice et y glisser lors de l'ouverture d'une fissure. Si les fibres ne glissent pas, elles se cassent au lieu de jeter un pont à travers la fissure. Inversement, si elles glissent trop, elles ne s'opposent plus à l'ouverture de la fissure, qui risque de se transformer en rupture macroscopique.

On étudie le décollement et le glissement des fibres en tirant sur l'une d'elles jusqu'à ce qu'elle sorte entièrement du composite. La force requise doit d'abord surmonter l'adhérence entre la fibre et la matrice pour que le glissement commence. La fibre d'alcool polyvinylique, fréquemment utilisée, a une surface hydrophile (attirant l'eau), qui adhère à la matrice, en se liant à des hydroxydes métalliques. Contrairement à la plupart des polymères, qui sont hydrophobes et glissent facilement dans la matrice). L'adhérence est même trop intense, de sorte que les fibres d'alcool polyvinylique pur se rompent souvent lorsqu'on tire dessus. C'est pourquoi nous avons fabriqué un mince revêtement de matériau hydrophobe, que nous avons étalé sur les fibres. Épais de 10 à 100 nanomètres, il affaiblit l'adhérence de la fibre au ciment.

LE BÉTON FLEXIBLE ECC pourrait contribuer à des infrastructures « intelligentes », capables de s'autoréparer et de détecter leurs propres dégâts

Le glissement enclenché, il ne doit pas durer indéfiniment. Dans l'ECC, il est de moins en moins facile à mesure qu'il progresse : les fibres sont conçues pour s'abraser en traversant le tunnel rugueux de la matrice (elles sont en quelque sorte polies par le glissement), de sorte qu'elles tendent à « s'accrocher » à ce tunnel *(voir la figure 4)*. Ainsi, la force nécessaire pour retirer la fibre augmente, ce qui explique la stabilisation de la largeur de la fissure et le mode plat de propagation.

L'ECC a récemment été utilisé au sein de plusieurs infrastructures, tels des bâtiments, des ponts, des routes et des canaux d'irrigation. Au Japon, plusieurs grands immeubles contiennent des poutres de ce matériau, qui les rend plus résistants aux tremblements de terre grâce à sa bonne ductilité en traction. C'est le cas de la tour résidentielle *Nabeaure Yokohama* de 41 étages, achevée en 2007 et localisée à Tokyo, ville qui a bien résisté au tremblement de terre de 2011. À chaque étage, quatre poutres d'ECC relient les coins des murs intérieurs *(voir la figure 5)*. Durant un tremblement de terre, elles sont soumises à une combinaison de forces longitudinales (de traction) et diagonales. Elles se déforment alors en développant des séries de microfissures, ce qui dissipe l'énergie communiquée au bâtiment par le séisme et limite les forces s'exerçant sur le reste de la structure.

Un matériau déjà en cours d'exploitation

L'ECC remplace aussi avantageusement le béton sur les ponts routiers, car la faible largeur des microfissures minimise les effets des variations de température, de la pénétration de chlorure (lors du salage des routes) et de la rouille formée sur les barres de renfort en acier, ainsi que les dégâts causés par l'usure. Quand la température varie, les poutres en acier se dilatent et se rétractent, mettant à rude épreuve le béton qui les surmonte.

Sur un pont du Michigan, au Nord-Est des États-Unis, on a ainsi installé une dalle en ECC pour jouer le rôle de joint de dilatation : elle s'étire quand le pont se dilate, puis se contracte en fermant les microfissures quand le pont reprend sa taille d'origine. Elle est bien plus efficace qu'une dalle en béton classique, qui se fissure plus profondément, laissant pénétrer l'eau salée, et se détériore plus vite, d'où la nécessité d'entretiens fréquents. Installée en 2005, la dalle d'ECC n'a pas nécessité de réparation jusqu'ici.

L'ECC pourrait contribuer à des infrastructures « intelligentes », capables notamment de s'autoréparer, ainsi que de détecter leurs propres dégâts et de les signaler à des stations à distance. Un échantillon d'ECC endommagé a été successivement mouillé et séché plusieurs fois en laboratoire : ses

© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013

issures se sont refermées toutes seules (*voir la figure 6*). L'analyse au microscope électronique à balayage a révélé que des composés solides se sont formés sur les bords de la fissure et sur la fibre qui la traverse. Ces composés sont constitués d'un mélange de silicate de calcium hydraté et de bicarbonate de calcium. Ils se sont formés lorsque l'eau et l'air (chargé en dioxyde de carbone) ont pénétré dans les fissures et ont réagi avec les ions calcium de l'ECC. Ils ont fini par sceller la microfissure. Comme ces composés se développent autour de la fibre, celle-ci renforce le matériau de réparation. Les mesures montrent que l'ECC récupère alors ses propriétés mécaniques, notamment sa résistance et sa ductilité.

Du béton intelligent

L'autodétection pourrait être réalisée au moyen de la tomographie par impédance électrique, une piste explorée par l'équipe de Jerome Lynch, à l'Université du Michigan. Cette technique consiste à faire circuler de faibles courants dans le matériau (ils se propagent dans le béton grâce à des mouvements d'ions entre les pores du ciment), puis à mesurer les variations de résistivité. En perturbant le flux d'ions, une microfissure augmente localement la résistivité. On dresse alors des cartes où les microfissures apparaissent comme des lignes de plus grande résistivité. Cette technique doit encore être améliorée, mais elle pourrait fournir un moyen de contrôle bon marché : on pourrait surveiller en permanence, sans l'aide de dispositifs externes, l'état d'une structure dotée des électrodes et des capteurs adéquats.

Ces fonctions d'autodétection et d'autoréparation peuvent être combinées : tandis que les dommages s'autoréparent, leur profondeur, et donc le degré de réparation, est mesurée en continu. Ainsi, le béton du futur ne sera pas seulement ductile, mais aussi intelligent. Il aidera à réaliser des infrastructures plus sûres et plus durables, avec une empreinte carbone et énergétique plus faible. ■

BIBLIOGRAPHIE

V. C. Li et E. Herbert, **Robust self-healing concrete for sustainable infrastructure**, *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 10, pp. 207-218, 2012.

V. C. Li, **Tayloring ECC for special attributes : A review**, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 6, pp. 135-144, 2012.

M. Sahmaran et V. C. Li, **Engineered cementitious composites : Can composites be accepted as crack-free concrete ?**, *Transportation Research Record*, vol. 2164, pp. 1-8, 2010.

J. Hou et J. P. Lynch, **Electrical impedance tomographic methods [...]**, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 20, pp. 1363-1379, 2009.

Palais DÉCOUVERTE

les conférences

au Palais de la découverte

entrée gratuite (réservation conseillée : conferences@universcience.fr

mercredi 29 mai à 19h

Les Martiens à six membres de « John Carter » sont-ils plausibles ?

Pourquoi ne trouve-t-on pas d'animaux à trois pattes, alors que c'est la configuration la plus stable ? Et vous, comment imaginez-vous la forme d'un extraterrestre ?

Avec les auteurs de la rubrique « Science & Fiction » de la revue *Pour la science* :

Roland Lehoucq et Sébastien Steyer.

programme complet sur www.universcience.fr

soutien d

SCIENCE

SCIENCE & VIE

plus

La fusion des SENS

Lawrence Rosenblum

Ce que nous entendons dépend notablement de ce que nous voyons et ressentons. Pourtant, l'intégration de toutes ces perceptions au sein du cerveau livre une version cohérente du monde environnant

À la fin des années 1970, le FBI engagea Sue Thomas et huit autres personnes sourdes pour analyser des empreintes digitales. On les supposait plus aptes à se concentrer sur cette tâche méticuleuse. Cependant, S. Thomas trouva ce travail d'une monotonie insupportable. Les agents du FBI, qui avaient remarqué son habileté à lire sur leurs lèvres, lui confièrent une autre tâche : ils lui montrèrent une vidéo muette, où deux suspects discutaient, et lui demandèrent de reconstituer leur conversation. S. Thomas s'en acquitta facilement, révélant l'implication des suspects dans des cercles de jeux clandestins. Ainsi débuta sa carrière en tant que premier expert – sourd – de lecture sur les lèvres du FBI.

Chez S. Thomas, cette compétence était particulièrement développée, car elle lui était nécessaire pour communiquer, mais nous l'utilisons tous plus ou moins. De fait, nous associons les mots lus sur les lèvres à ceux entendus, et nous comprenons moins bien notre interlocuteur quand nous ne voyons pas ses lèvres, en particulier s'il a un accent inconnu ou si l'environnement est bruyant. Voir parler aide aussi à apprendre à parler. Ainsi, cet apprentissage est souvent plus long chez les enfants aveugles. Les recherches récentes ont éclairé la façon dont le cerveau organise les informations reçues des différents sens.

Autrefois, le cerveau était vu comme un couteau suisse, où chaque sens aurait une région dédiée. La plupart des neuroscientifiques et des psychologues pensent aujourd'hui que l'évolution a conduit à des échanges importants entre les sens – autrement dit, à des aires sensorielles « entrelacées » physiquement dans le cerveau. Ainsi, bien que le cortex visuel traite essentiellement la vue, il peut aussi être influencé par d'autres informations sensorielles, issues par exemple du toucher. Les chercheurs peuvent changer les résultats de tests de goût en modifiant ce que les sujets entendent. L'endroit où nous regardons et ce que nous voyons influent sur notre posture.

L'ESSENTIEL

- On pensait auparavant que les aires cérébrales consacrées aux différents sens (la vue, l'ouïe, l'odorat, le goût et le toucher) interagissaient peu.
- Au cours des 30 dernières années, on s'est aperçu que le cerveau mêle les informations issues de sens distincts.
- Ces recherches ont inspiré de nouveaux moyens d'aider les aveugles et les sourds, et ont contribué à améliorer les logiciels de reconnaissance vocale.

© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013



En d'autres termes, les recherches de ces 15 dernières années montrent qu'aucun de nos sens ne fonctionne isolément. On espère s'en inspirer pour améliorer les dispositifs d'assistance aux personnes aveugles ou sourdes, tels les implants cochléaires (où les sons sont transformés en impulsions électriques, qui stimulent directement les fibres nerveuses normalement activées par les cellules de l'audition, les cellules ciliées).

Voir et sentir les mots

L'un des premiers exemples d'interaction sensorielle, décrit par les psychologues cognitivistes britanniques Harry McGurk et John MacDonald en 1976, est nommé l'effet McGurk. Si vous regardez une personne formant silencieusement sur ses lèvres la syllabe « ga » tout en écoutant un enregistrement sonore de la syllabe « ba », vous entendrez la syllabe « da ». La syllabe « ga » silencieuse modifie la perception de la syllabe « ba » audible, car le cerveau mélange ce que l'on entend et voit. L'effet McGurk fonctionne dans toutes les langues et se manifeste encore chez quelqu'un qui l'a étudié pendant 25 ans – je peux en témoigner.

Les paroles entendues sont aussi influencées par les paroles « ressenties ». En 1991, Carol Fowler, du Collège Dartmouth, aux Etats-Unis, et ses collègues ont demandé à des volontaires de s'essayer à la technique Tadoma, qui consiste à interpréter les paroles de quelqu'un en plaçant les doigts sur ses lèvres, ses joues et son cou (avant l'apparition des implants cochléaires, de nombreuses personnes sourdes et aveugles utilisaient cette technique). Dans le même temps, d'autres syllabes étaient émises par des haut-parleurs voisins. Les syllabes ressenties par les volontaires modifiaient leur perception des syllabes entendues.

En 1997, Gemma Calvert, de l'Université d'Oxford, fit une cartographie des aires cérébrales impliquées dans la lecture sur les lèvres. Des volontaires inexpérimentés lisaient sur les lèvres d'un individu qui articulait des nombres, de un à neuf. G. Calvert et ses collègues découvrirent que la lecture sur les lèvres active le cortex auditif – qui traite les sons – et des aires cérébrales apparentées, connues pour s'activer quand on entend des mots. C'était l'une des premières preuves d'influences sensorielles multiples dans une aire cérébrale que l'on pensait consacrée à un seul sens, la vision. Des études plus récentes ont confirmé la multiplicité des influences. Ainsi, une partie du tronc cérébral supposée impliquée uniquement dans un traitement rudimentaire des sons réagit aussi lorsqu'on voit quelqu'un parler sans l'entendre. Des études d'imagerie cérébrale ont montré que durant l'effet McGurk – le fait d'entendre « da » alors que le son diffusé est « ba » –, le cerveau se comporte comme si la syllabe « da » parvenait aux oreilles du sujet.

Ces découvertes suggèrent que dans le cerveau, les informations vocales recueillies par l'intermédiaire des oreilles, des yeux et de la peau sont toutes importantes. Cela ne signifie pas que ces canaux fournissent une quantité égale d'informations, car l'ouïe est sensible à des détails (tels des mouvements de la langue qui modifient le son) inaccessibles à la vue ou au toucher.

Dans d'autres cas, les sens s'entraident pour extraire une même information, telle l'identité du locuteur. Chacun a des traits visuels et auditifs caractéristiques dans sa façon de parler. Mes collègues et moi avons filmé des personnes en train de parler et modifié les vidéos résultantes, afin de retirer toutes les caractéristiques faciales reconnaissables – transformant les visages en motifs de points brillants qui remplaçaient les joues et les lèvres. Les volontaires à qui nous avons présenté ces vidéos ont réussi à lire sur les « lèvres » de ces amas de points et à reconnaître leurs amis !

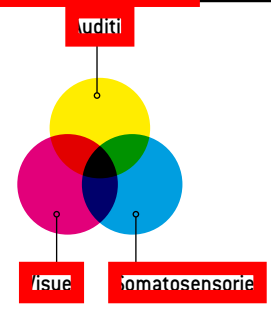
Des sons simples dérivés de la parole d'un locuteur renseignent aussi sur son identité. Robert Remez, de l'Université Columbia, à New York, et ses collègues ont transformé des paroles enregistrées en ondes sinusoïdales, qui ressemblaient aux sifflements émis par le robot R2-D2 dans le film *La guerre des étoiles*. Malgré l'absence de paramètres caractéristiques d'une voix tels que le ton et le timbre, les auditeurs ont reconnu leurs amis. Plus étonnant, des sujets ont visionné une série de vidéos représentant les locuteurs par des points brillants, et identifié ceux qui émettaient telle ou telle onde.

Le fait qu'on associe la même information sur l'identité à ces perceptions visuelles et auditives suggère qu'elles sont enchevêtrées dans le cerveau. Les études d'imagerie cérébrale confirment cette connexion : écouter la voix d'une personne connue active le gyrus fusiforme, une aire cérébrale impliquée dans la reconnaissance des visages.

Si les formes de perception sont mélangées, apprendre à lire sur les lèvres de quelqu'un permettrait de mieux le comprendre quand il parle (ses mots deviendraient alors plus audibles). Nous avons demandé à des volontaires de lire sur les lèvres d'une personne qui parlait pendant une heure dans un film muet. Ces volontaires

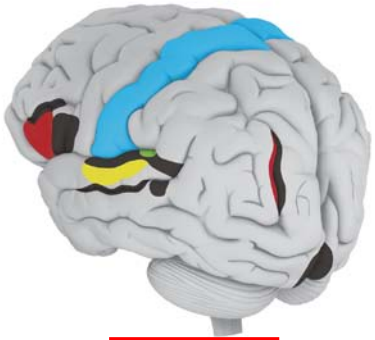
DES AIRES CEREBRALES A LA CROISEE DES SENS

Les neuroscientifiques savaient depuis quelques décennies que l'activité de certaines aires cérébrales *(en noir)* est influencée par plusieurs sens. Des perceptions visuelles et somatosensorielles (tels le toucher et la température) peuvent par exemple se mêler au sein d'une même région. On s'est récemment aperçu que ce phénomène est bien plus répandu dans le cerveau qu'on ne le pensait





SCHEMA CLASSIQUE



NOUVEAU SCHEMA

Si un neurone dans une aire cérébrale répond à plusieurs sens, on le qualifie de multisensoriel. Dans les aires sensorielles classiques, ces neurones sont rares

© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013

ont ensuite écouté un ensemble de phrases mêlées à un fond sonore aléatoire. À leur insu, la moitié des participants entendaient des phrases prononcées par la personne sur les lèvres de laquelle ils venaient de lire. Ils ont mieux réussi à détecter les phrases au milieu du bruit de fond que les autres.

Les résultats sur la perception multisensorielle de la parole ont incité les chercheurs à examiner tous les types d'interactions. Dès lors, ils ont multiplié les découvertes. Le goût perçu est par exemple influencé par l'odeur, mais aussi par les images et les sons. Ainsi, une boisson parfumée à l'orange semble avoir le goût de cerise si elle est colorée en rouge, et *vice versa*. En 2005, Massimiliano Zampini, de l'Université de Trente, en Italie, et son équipe ont montré que la diffusion d'un son modifié de « croquant » à des sujets qui mangent des chips change la façon dont ils perçoivent la fraîcheur et le croustillant de l'aliment. Quand on regarde un motif visuel qui descend continuellement, telle une chute d'eau, tout en touchant certaines surfaces immobiles, on a l'impression que ces surfaces sont en train de monter. Tom Stoffregen, de l'Université du Minnesota, et ses collègues ont demandé à des sujets de se tenir droits et de déplacer leur regard, d'une cible proche à une cible éloignée. Ce décalage de leur centre d'attention visuel a entraîné de légères modifications de leur posture.

Des interactions dans tous les sens

L'activité d'une aire sensorielle est donc souvent modulée par des signaux issus de plusieurs sens. En outre, le cerveau fait preuve d'une plasticité importante : une aire cérébrale peut changer de fonction lors d'une privation sensorielle, même partielle ou de courte durée. Des études d'imagerie menées depuis quatre ans l'ont confirmé pour le cortex visuel : quand on bande les yeux d'une personne ne serait-ce que durant une heure et demie, on constate que son cortex visuel se met à réagir au toucher, ce qui renforce la sensibilité tactile. Autre exemple, la myopie accroît souvent les facultés auditives et spatiales d'un individu, même s'il porte des lunettes (qui laissent flou une partie du champ visuel périphérique). Ainsi, la compensation multisensorielle est omniprésente.

On en déduit des indications thérapeutiques pour ceux qui ont perdu l'un de leurs cinq sens. Par exemple, les implants cochléaires sont moins efficaces si le cerveau a eu trop de temps pour « reprogrammer » le cortex auditif pour d'autres formes de perception, tels la vue et le toucher. C'est pourquoi, quand on décide de mettre un implant cochléaire à un enfant sourd de naissance, mieux vaut le faire aussi tôt que possible. On encourage aussi les enfants sourds dotés de ces implants à regarder des films de personnes qui parlent, afin qu'il apprennent à associer les mouvements des lèvres à ce qu'ils entendent.

Les dispositifs de reconnaissance de la parole (tels ceux traduisant les paroles captées par un microphone en un texte écrit) ont aussi bénéficié des recherches sur la perception multisensorielle. Ces dispositifs sont souvent perturbés par le bruit de fond, même modéré. Quand on leur fait analyser les mouvements de la bouche du locuteur (ils doivent alors disposer d'une caméra), leur précision s'améliore notablement. Cette stratégie fonctionne avec les caméras des téléphones cellulaires.

La notion de perception multisensorielle semble contredire notre expérience quotidienne. D'instinct, nous séparons les sens, qui paraissent traiter des aspects différents du monde. Nous utilisons les yeux pour voir et les oreilles pour entendre ; nous ressentons la consistance d'une pomme avec les mains et son goût avec la langue. Cependant, lorsqu'une information sensorielle atteint le cerveau, tout s'amalgame. Le cerveau ne range pas l'information visuelle provenant des yeux dans un conteneur neuronal, et celle, auditive, issue des oreilles dans un autre. Au contraire, il interprète le monde qui nous entoure en mêlant les diverses formes de perceptions sensorielles. ■

Aire multisensorielle ou redirection de l'attention ?

La privation temporaire d'un sens augmente la sensibilité aux autres sens, ce que l'auteur de l'article semble attribuer aux capacités multisensorielles des aires cérébrales. Ainsi, le cortex visuel s'active en réponse au toucher lorsqu'on a les yeux bandés depuis une heure et demie. Toutefois, cette activation pourrait être le signe non pas d'un traitement des données tactiles par le cortex visuel (qui n'est plus accaparé par les données visuelles), mais d'associations apprises entre les deux types de propriétés : on associe par exemple une certaine texture tactile avec l'apparence des objets sur lesquels on l'a rencontrée, de sorte que toucher cette texture active le cortex visuel.

D'où viendrait alors l'augmentation de la sensibilité au toucher ? Elle pourrait être due à des effets attentionnels : n'étant plus mobilisée par les autres sens, l'attention peut se concentrer sur le toucher. Des études supplémentaires sont nécessaires pour trancher. Le phénomène est différent lors de la privation définitive d'un sens : chez les aveugles, par exemple, le cortex visuel se « recâble » pour l'audition, et l'augmentation de la sensibilité aux sons est donc due à l'établissement de nouvelles connexions neuronales.

Pascal Mamassian, Laboratoire Psychologie de la perception, CNRS et Université Paris Descartes

L'AUTEUR



Lawrence ROSENBLUM est professeur de psychologie à l'Université de Californie à Riverside, aux États-Unis.

SUR LE WEB

Vidéos sur l'effet McGurk et d'autres expériences de perception multisensorielle : ScientificAmerican.com/jan2013/multisensory-perception.

BIBLIOGRAPHIE

Barry Stein (éd.), **The New Handbook of Multisensory Processing**, MIT Press, 2012.

L. Rosenblum, **See What I'm Saying : The Extraordinary Power of Our Five Senses**, W. W. Norton, 2010.

L. Rosenblum, **Speech perception as a multimodal phenomenon**, *Current Directions in Psychological Science*, vol. 17, pp. 405-409, 2008.

Les grappes de **sphères collantes**

Brian Hayes

Dans un tas de billes, quel est le nombre maximal de contacts que l'on peut former ? On connaît depuis peu la réponse… mais seulement pour moins de 12 billes !

Prenez 12 billes identiques, et serrez-les pour former un amas compact. Comptez alors le nombre de points où les billes se touchent. Quel est le plus grand nombre que vous pouvez obtenir ? Quel est l'arrangement géométrique correspondant ? La grappe optimale est-elle unique, ou bien en existe-t-il plusieurs donnant le même maximum ?

Pour une grappe constituée de trois, quatre ou cinq sphères de taille égale, on imagine que le problème ne pose pas de difficultés particulières. Mais il se corse très vite quand la taille des grappes augmente. Ces trois dernières années, le nombre maximal de contacts a été déterminé pour les grappes comprenant jusqu'à 11 sphères. Pour ce faire, il a fallu recourir à des outils mathématiques empruntés à la théorie des graphes ou à la géométrie, ainsi qu'à de gros calculs et, à quelques étapes cruciales, à la construction de modèles de boules et de tiges.

Pour les grappes de 12 sphères ou plus, on ne connaît toujours pas les réponses. Il est un peu humiliant d'être mis en échec par de si modestes tas de billes, mais ce n'est en fait pas si surprenant. Les problèmes d'empilements compacts de sphères sont notoirement épineux. Certains résistent depuis des siècles.

Ainsi, en 1611, Johannes Kepler a affirmé que l'empilement le plus dense possible de sphères identiques est l'arrangement correspondant aux pyramides d'oranges que l'on voit chez les marchands de primeurs (*voir la figure 1*). Toute sphère y touche 12 autres sphères, et la fraction du volume rempli par les sphères s'élève à $\pi/\sqrt{18}$, soit environ 0,74. Kepler pensait apparemment que la supériorité de son empilement était tellement évidente qu'aucune démonstration n'était nécessaire ; et aucune preuve n'a été fournie pendant près de 400 ans. Ce n'est qu'en 1998 que Thomas Hales, de l'Université de Pittsburgh, a enfin démontré qu'aucun autre empilement tridimensionnel n'était plus dense.

La conjecture de Kepler et sa démonstration par Th. Hales s'appliquent à un réseau infini de sphères. Mais une autre énigme pluricentenaire concerne les grappes finies. Tout a commencé dans les années 1690 avec une dispute entre Isaac Newton et son disciple David Gregory. D'après une version de

L'ESSENTIEL

- Les empilements de sphères intéressent depuis longtemps les mathématiciens et les physiciens.
- L'une des questions porte sur le nombre maximal de contacts entre sphères dans un empilement fini.
- Ce problème est facile pour moins de cinq sphères, mais il n'a été résolu que récemment pour des agrégats contenant jusqu'à 11 sphères.
- Le cas d'une grappe de 12 sphères pourrait être bientôt réglé. Au-delà, c'est l'inconnu.



© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013

l'histoire, Newton soutenait qu'une sphère centrale ne pouvait pas toucher plus de 12 autres sphères identiques, alors que, selon Gregory, il y avait de la place pour une 13e sphère dans le halo. Ce problème du « nombre de baisers » n'a été résolu qu'en 1953, quand l'Allemand Kurt Schütte et le Néerlandais Bartel van der Waerden ont prouvé que Newton avait raison, mais de justesse : quand on introduit une 13e sphère dans la grappe, le diamètre global n'augmente que d'environ cinq pour cent *(voir la figure 2)*.

Pourquoi le compactage des sphères suscite-t-il autant d'intérêt ? Kepler tentait d'expliquer les symétries des flocons de neige, et de nombreux travaux ultérieurs sur les empilements de sphères étaient également motivés par des questions sur la structure des solides et des liquides. L'accent mis récemment sur les grappes a pour origine l'étude des colloïdes, poudres et autres systèmes physiques où la cohésion des amas de particules est assurée par des forces de très courte portée.

Pour construire des grappes et compter les contacts, il est commode de travailler avec des sphères de diamètre de 1 (donc de rayon 1/2). Quand deux telles sphères se touchent, la distance entre leurs centres vaut 1. Les diagrammes accompagnant cet article montrent une tige de longueur 1 reliant les centres des sphères qui se touchent. Certains modèles physiques des grappes (dont les kits *Geomag*) conservent ce squelette de tiges de liaison et omettent complètement les sphères.

Maximiser les contacts

Dans une grappe de n sphères, notons C_n le nombre total de points de contact, et $\max(C_n)$ la valeur maximale de C_n que l'on rencontre parmi toutes les grappes de n sphères. Pour les plus petites valeurs de n, il n'est pas difficile de trouver $\max(C_n)$ *(voir la figure 3)*.

Le cas $n = 1$ est trivial : une sphère isolée ne touche rien, donc $\max(C_1) = 0$. Deux sphères ne peuvent se toucher qu'en un point, d'où $\max(C_2) = 1$. Pour trois sphères, la meilleure solution est de placer les centres des sphères aux sommets d'un triangle équilatéral ; dans cette configuration, il y a trois points de contact, donc $\max(C_3) = 3$. On peut placer une quatrième sphère au sommet du triangle pour créer un tétraèdre régulier à six contacts deux à deux, d'où $\max(C_4) = 6$.

1. CETTE « GRAPPE » DE DIX ORANGES, construite sur le même mode que l'empilement compact de Kepler, contient 22 contacts entre deux oranges. On peut faire mieux : il existe trois grappes de dix sphères identiques présentant 25 contacts.



Il est également facile de prouver qu'aucune autre configuration de n sphères, pour $n \leq 4$, ne pourrait avoir un C_n supérieur. En effet, dans ces grappes, chaque sphère touche chacune des autres sphères, et donc le nombre de contacts ne pourrait pas être supérieur. Dans la terminologie de la théorie des graphes, une telle grappe est une clique ; le nombre de contacts dans une grappe-clique est $n(n-1)/2 = 0, 1, 3, 6, 10, 15, 21\ldots$

Mais à partir de $n = 5$, il est impossible de disposer cinq sphères identiques de façon qu'elles se touchent toutes. Si une clique à cinq sphères existait, elle aurait dix points de contact. Mais on ne peut faire mieux que $C_5 = 9$, qui est le nombre de contacts formés quand on attache une cinquième sphère à une face quelconque de la grappe tétraédrique. La structure ainsi obtenue est une dipyramide triangulaire.

Jusqu'ici, pour chaque valeur de n, il y avait une unique grappe qui maximise C_n. De plus, dans chaque cas, la grappe la mieux connectée comportant $n + 1$ sphères peut être obtenue par incrément en collant une nouvelle sphère quelque part à la surface de la grappe réalisant $\max(C_n)$.

Ces propriétés cessent d'être vraies à partir de $n = 6$. Avec six sphères, deux formes de grappes donnent le même nombre maximal de contacts, $C_6 = 12$ *(voir la figure 4)*. L'une est construite par incrément, à partir de la dipyramide triangulaire à cinq sphères. Mais l'autre, l'octaèdre, ne peut pas être créée en collant simplement une sphère à la surface d'une grappe optimale plus petite.

Au-delà de $n = 6$, trouver toutes les grappes ayant le maximum de contacts devient plus difficile. Pour $n = 7$, l'approche incrémentale consistant à rajouter une sphère à la surface d'une grappe de $n = 6$ donne quatre solutions à 15 points de contact ($C_7 = 15$). Trois de ces grappes sont constituées de quatre tétraèdres collés face contre face de diverses façons *(voir la figure 5)*.

En passant un peu de temps avec les *Geomag* ou un autre jeu de modèles tridimensionnels, on a de bonnes chances de trouver ces quatre configurations. Mais comment savoir s'il n'y a pas d'autres grappes de sept sphères à 15 contacts ? Et comment prouver que l'on ne peut avoir 16 contacts, voire plus ?

Il s'avère que 15 est effectivement le nombre maximal de contacts pour sept sphères, mais il y a aussi une cinquième grappe qui le réalise ; il s'agit d'une dipyramide pentagonale *(voir la figure 5e)*. Dotée d'une symétrie d'ordre cinq, cette structure n'a aucun motif en commun avec l'une quelconque des grappes plus petites. La nouveauté de cet objet soulève une fois de plus la question : comment être sûr qu'il n'existe pas d'autres configurations à découvrir ?

Pour répondre à ces questions, un programme fructueux a été lancé il y a cinq ans par Natalie Arkus, alors doctorante à l'Université Harvard. Dans une série d'articles écrits avec ses collègues Michael Brenner et Vinothan Manoharan, elle a énuméré toutes les configurations réalisant $\max(C_n)$ pour $n = 7, 8, 9, 10$. Les résultats ont ensuite été étendus à $n = 11$ par Robert Hoy, Jared Harwayne-Gidansky et Corey O'Hern, de l'Université Yale. Tous les résultats que je décris ici sont issus des travaux de ces deux groupes.

Force de courte portée

Une façon de résoudre les problèmes d'empilements compacts de sphères est de considérer ces dernières comme des particules en interaction *via* une certaine force. Par analyse mathématique ou par des simulations numériques, on peut alors essayer de trouver une configuration géométrique qui minimise l'énergie potentielle du système. En général, la force s'exerçant entre deux particules est une fonction régulière de la distance qui les sépare. Quand les deux particules sont très éloignées, la force est négligeable ; à plus courte portée, la force devient fortement attractive ; à des distances encore plus courtes, une répulsion dite « de cœur dur » empêche les sphères de s'interpénétrer. À l'équilibre, les particules soumises à une force de ce type se disposent avec une séparation petite, mais non nulle.

Le problème du dénombrement des contacts peut être traduit en termes de forces et d'énergie, mais de façon assez particulière. Tout d'abord, la force n'est ici pas une fonction régulière de la distance. Tant que les sphères ne se touchent pas, aucune force ne s'exerce. Mais si les sphères viennent à se toucher, elles se collent ; brusquement, la force devient attractive. Et toute tentative de les rapprocher davantage se heurte à une résistance infinie.

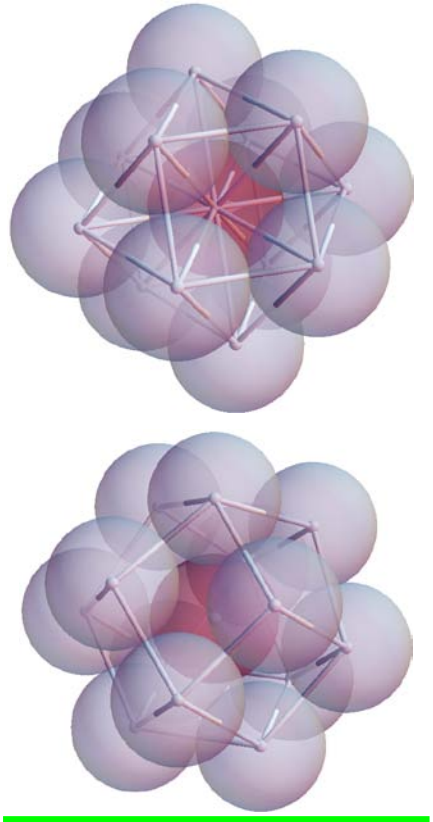
Dans ce monde des sphères collantes, la portée des forces en jeu est plus que courte : elle est nulle (Martin Gardner avait suggéré un modèle pour de tels systèmes : des balles de ping-pong recouvertes de mastic).

L'AUTEUR



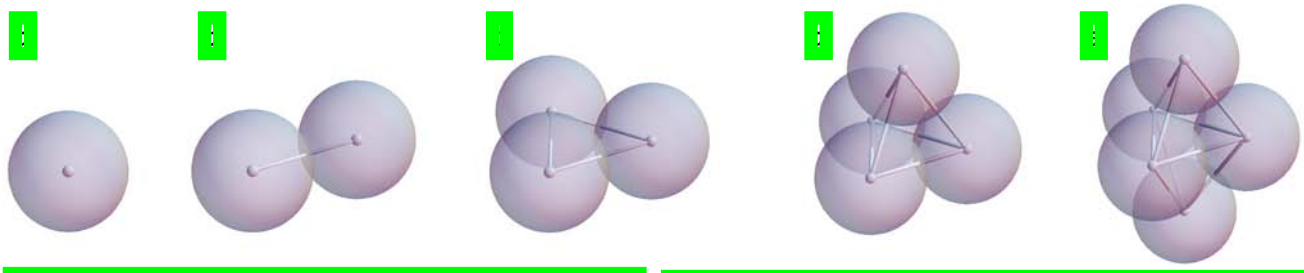
Brian HAYES collabore à la revue *American Scientist* où il tient depuis 1993 la chronique *Computing Science*. Son blog (http://bit-player.org/) est également consacré à des questions mathématiques.

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



2. LE PROBLÈME DU NOMBRE DE BAISERS consiste à se demander combien de sphères peuvent toucher une sphère centrale de même taille. Il n'a reçu une réponse que dans les années 1950. En haut, 12 sphères sont en contact avec la sphère centrale rouge, dans une configuration dérivée du réseau hexagonal compact de Johannes Kepler. Lorsqu'on ajoute une 13e sphère *(en bas)*, tout le halo de sphères perd contact avec la sphère centrale, bien que le diamètre de la grappe n'augmente que d'environ cinq pour cent. Dans ces diagrammes, si deux sphères se touchent, leurs centres sont reliés par un bâtonnet.

© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013



3. NOMBRES MAXIMAUX DE CONTACTS. Une sphère isolée n'a pas de contact *(a)*. Deux sphères ne peuvent se toucher qu'en un point *(b)*. Trois sphères peuvent former un triangle équilatéral, avec trois contacts *(c)*. Quatre sphères disposées en tétraèdre ont six contacts *(d)*. Dans ces quatre cas, chaque sphère touche chaque autre sphère de la grappe, mais il n'existe plus de configuration de ce type à partir de cinq sphères. Pour ce cas, la meilleure configuration est celle d'une dipyramide triangulaire, avec neuf points de contact *(e)*.

L'énergie totale de deux sphères diminue quand elles se touchent, et il faut apporter de l'énergie pour les séparer ; mais une fois séparées, elles n'ont plus d'influence l'une sur l'autre. L'énergie potentielle de l'ensemble du système est donc minimale quand le nombre de contacts est maximal.

La nature discontinue de la loi de force modifie le type d'outils mathématiques à utiliser. Avec une loi de force régulière, on peut résoudre les problèmes d'empilements compacts de sphères par des méthodes d'optimisation continue. Un tel algorithme essaie de réduire l'énergie totale en ajustant petit à petit les positions des particules, et en continuant jusqu'à ce qu'aucun progrès ne soit obtenu. Cette approche ne fonctionne pas avec les sphères collantes, parce qu'il n'y a pas de gradient régulier pour guider les particules vers les configurations de basse énergie. C'est pourquoi le problème des sphères collantes a pu paraître plus ardu que la plupart des autres questions d'empilements compacts de sphères.

D'un autre côté, la nature discrète (tout ou rien) de l'énergie potentielle des sphères collantes confère un avantage important. Puisque chaque paire de sphères soit se touche, soit ne se touche pas, le nombre de configurations essentiellement différentes est fini. En principe, on peut examiner toutes ces possibilités et simplement choisir celle présentant le plus de contacts, donc l'énergie potentielle la plus basse. C'est cet angle d'approche – l'idée que le problème peut être résolu par une énumération exhaustive – qui a conduit aux résultats récents des équipes de Harvard et Yale.

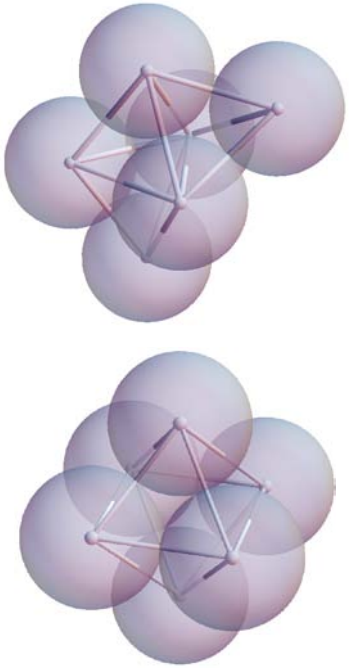
On peut représenter toutes les données essentielles relatives aux contacts au sein d'une grappe de sphères par un graphe, c'est-à-dire un ensemble de sommets et d'arêtes. Chaque sphère est représentée par un sommet, et deux sommets sont reliés par une arête si et seulement si les sphères correspondantes sont en contact. La même information peut être codée de façon encore plus abstraite dans une « matrice d'adjacence ». Une grappe de n sphères devient une matrice (un tableau) $n \times n$ de 0 et de 1 : l'élément de matrice à l'intersection de la ligne i et de la colonne j vaut 1 si la sphère i touche la sphère j, et 0 sinon.

De la géométrie à la théorie des graphes

Une grappe de sphères étant donnée, il est facile de construire le graphe ou la matrice d'adjacence correspondants. Mais, inversement, est-il possible de reconstituer la géométrie de la grappe à partir d'une matrice d'adjacence ? En d'autres termes, sans autre point de départ qu'un tableau indiquant quelles sphères se touchent, peut-on déterminer les coordonnées de toutes les sphères dans l'espace à trois dimensions ?

Pas toujours. Par exemple, la matrice constituée exclusivement de 0 ne révèle rien sur les positions des sphères, mis à part qu'elles ne se touchent pas. Et la matrice constituée uniquement de 1 décrit une grappe qui ne peut tout simplement pas exister dès lors que $n \geq 4$. Mais pour une classe importante de grappes, la matrice d'adjacence apporte assez d'information pour autoriser une reconstruction complète. Cette classe inclut les grappes qui maximisent le nombre de contacts. Ces éléments suggèrent une stratégie de résolution directe : recenser toutes les matrices candidates, puis vérifier lesquelles produisent des grappes géométriquement possibles.

Combien de matrices d'adjacence faut-il tester ? Puisque le contact est une relation symétrique (si i touche j, alors j touche i), toute l'information de la matrice est confinée à son triangle supérieur, qui comporte $n(n-1)/2$ éléments (*voir la figure 6*). Chaque élément a deux valeurs possibles, si bien



4. POUR LES GRAPPES DE SIX SPHERES, deux géométries distinctes maximisent le nombre de contacts. La grappe du haut est construite par incrément à partir de la grappe optimale à cinq sphères en attachant une sixième sphère à une face de la dipyramide triangulaire. L'autre configuration est l'octaèdre *(en bas)*. Les deux structures ont chacune 12 points de contact.

que le nombre total de matrices d'adjacence différentes est $2^{n(n-1)/2}$.

Passer au crible $2^{n(n-1)/2}$ matrices serait une tâche redoutable ; la valeur de cette expression dépasse déjà deux millions pour $n = 7$, et 10^{16} pour $n = 11$. Mais toutes ces matrices ne sont pas distinctes. Beaucoup ne représentent qu'un étiquetage différent d'un même graphe. Quand on élimine ces redondances de ce type, le nombre de matrices 7×7 distinctes tombe de 2 097 152 à seulement 1 044.

Un autre tri a permis à N. Arkus et ses collègues de réduire encore ce nombre de façon spectaculaire. Pour des raisons que j'expliquerai plus loin, ces chercheurs n'ont examiné que les matrices remplissant deux critères : chaque colonne et chaque ligne doivent comporter au moins trois 1, et le nombre total de 1 dans le triangle du haut est $3n - 6$. Pour $n = 7$, le fait d'imposer ces conditions réduit le nombre de matrices d'adjacence candidates de 1 044 à seulement 29. Et parmi ces 29 matrices, seules cinq correspondent à de véritables empilements compacts de sphères.

Comment ces structures géométriques ont-elles été déterminées ? L'idée centrale est de transformer la matrice d'adjacence A en une matrice de distance D. Alors que chaque élément A_{ij} de la matrice d'adjacence est une valeur binaire (0 ou 1) qui répond à la question « Oui ou non les sphères i et j se touchent-elles ? », l'élément D_{ij} est un nombre réel donnant la distance euclidienne entre i et i.

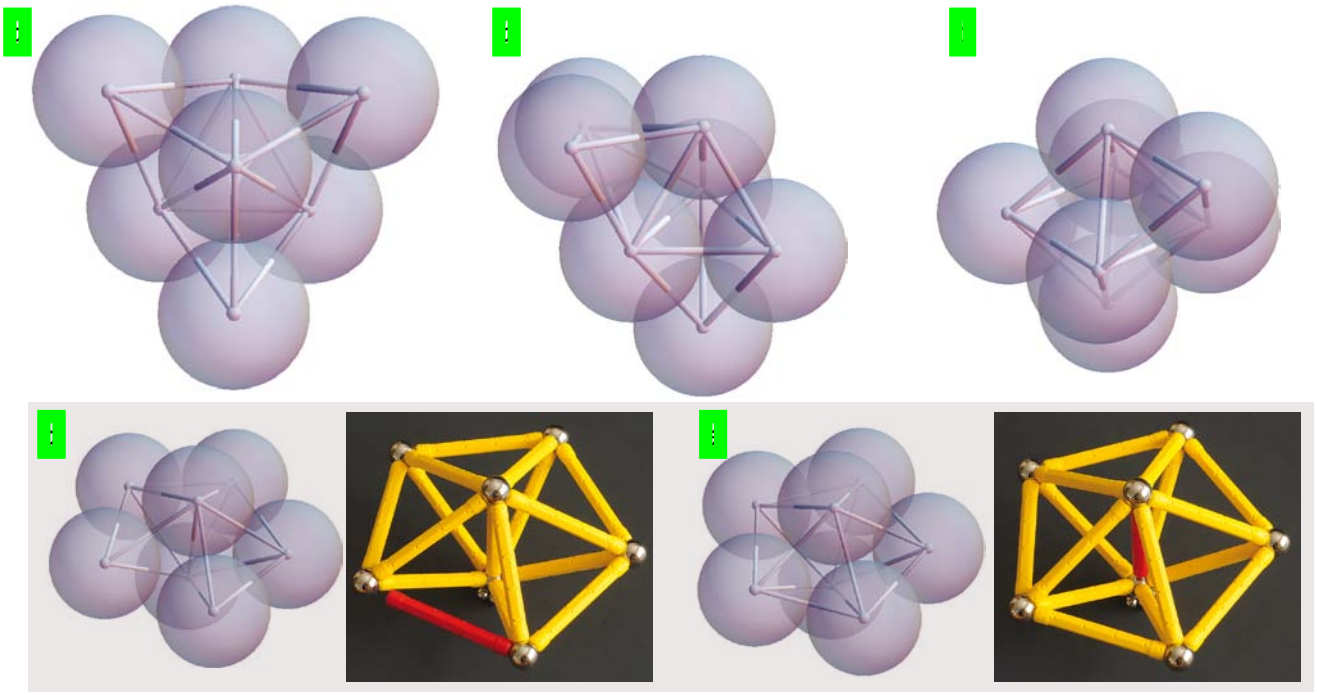
Il se trouve que nous connaissons déjà certaines de ces distances. Chaque 1 de la matrice d'adjacence désigne une paire de sphères unité, dont les centres sont écartés d'une distance exactement égale à 1 ; ainsi, $A_{ij} = 1$ implique $D_{ij} = 1$. Nous savons même quelque chose des autres distances : une grappe n'est possible que si tous les éléments de la matrice de distance satisfont la contrainte $D_{ij} \geq 1$. Toute distance inférieure à 1 signifierait que deux sphères s'interpénètrent.

Réduire le nombre de matrices d'adjacence à examiner

Pour déterminer complètement la géométrie d'une grappe, il faut déterminer les coordonnées x, y et z de chacune de ses n sphères. Une règle algébrique élémentaire suggère qu'il faudrait $3n$ équations pour déterminer ces $3n$ inconnues ; en fait, il suffit de $(3n - 6)$ équations. Pourquoi ? L'énergie de la grappe ne dépend que des positions relatives des n sphères, et non de la position ou de l'orientation de la grappe dans son ensemble. Par conséquent, on peut arbitrairement supposer qu'une sphère est située à l'origine O du système de coordonnées, et qu'une autre, en contact avec elle, en est éloignée d'exactement une unité sur la partie positive de l'axe Ox. Six coordonnées sont ainsi fixées. Il s'ensuit que les $(3n - 6)$ équations fournies par les 1 de la matrice d'adjacence sont exactement ce dont on a besoin pour localiser le reste des sphères.

Le fait que l'on ait juste assez de contraintes pour résoudre le système d'équations est plus qu'une simple coïncidence ; c'est également une condition nécessaire pour la stabilité mécanique dans une grappe. Spécifiquement, $(3n - 6)$ contacts et au moins trois contacts par sphère confèrent à une grappe ce qu'on appelle une rigidité minimale. Si l'une quelconque des sphères n'avait qu'un ou deux contacts, elle pourrait ballotter ou osciller librement. Une telle grappe ne peut pas être une configuration réalisant le maximum de C_n, car la sphère non contrainte peut toujours pivoter pour entrer en contact avec au moins une sphère de plus, augmentant ainsi C_n.

Chacune des $(3n - 6)$ équations est de la forme



5. LES GRAPPES DE SEPT SPHERES les mieux connectées ont 15 contacts. Trois des structures ci-dessus *(a, b, d)* sont des assemblages de quatre tétraèdres réguliers collés par différentes faces. La grappe *b* est chirale (il en existe une forme droite et une autre gauche). La grappe *c* est formée d'un octaèdre collé par une de ses faces à un tétraèdre. Les grappes *d* et *e* semblent identiques, mais ont en fait des structures très différentes, comme le montrent les modèles *Geomag* (la tige rouge indique une paire de sphères qui ne sont pas en contact).

© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013

$(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2 = 1$, ce qui signifie que la distance entre les centres des sphères i et j est égale à 1. Pour obtenir les coordonnées de toutes les sphères, ce système d'équations doit être résolu. Pour ce faire, N. Arkus a d'abord essayé une technique nommée base de Gröbner, qui s'est imposée ces dernières années comme un outil puissant de la géométrie algébrique. La méthode offre un moyen systématique de réduire le nombre de variables jusqu'à l'obtention d'une solution. Une implémentation de l'algorithme de base de Gröbner intégré à un système de calcul formel est parvenue à résoudre les équations pour $n = 7$, mais elle s'est révélée trop lente pour $n = 8$.

Des règles géométriques

Une autre approche repose sur des méthodes numériques qui convergent vers une solution par approximations successives. L'exemple le plus connu est la méthode de Newton, qui calcule les racines d'une équation en affinant une estimation initiale. N. Arkus a trouvé que les techniques numériques étaient efficaces, mais elle craignait qu'elles ne garantissent pas de trouver toutes les solutions valables (quand l'algorithme converge, le résultat est une solution correcte, mais une non-convergence ne signifie pas nécessairement qu'il n'existe pas de solution ; cela dépend aussi de l'estimation initiale).

Mettant de côté les méthodes algébriques et numériques, N. Arkus a choisi de se fier au raisonnement géométrique comme guide pour assembler des grappes réalisables et comme moyen d'exclure celles qui sont physiquement impossibles. Une règle de base pour les sphères unité est que si i touche j, alors le centre de j doit se trouver quelque part sur une sphère de rayon 1 centrée sur i. Si k touche à la fois i et j, alors le centre de k doit se trouver quelque part sur l'intersection circulaire de deux sphères voisines. Si l touche à la fois i, j et k, les sites possibles se résument à un ensemble de deux points *(voir la figure 7)*. Avec une poignée de règles générales de ce type, il est toujours possible de déterminer les distances inconnues dans une matrice de distance, à supposer que la matrice d'adjacence décrive une structure réalisable.

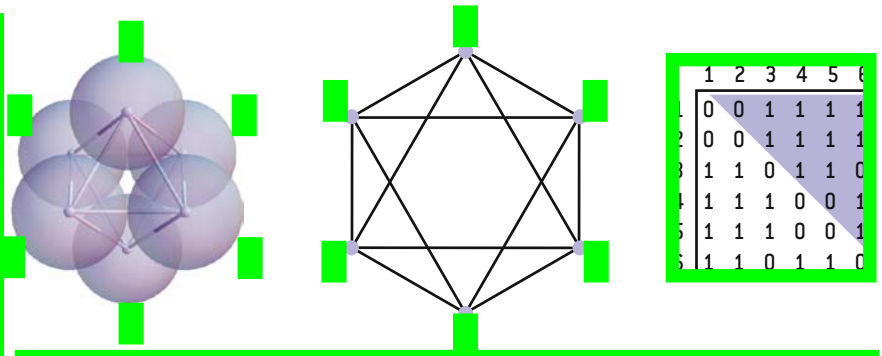
On peut appliquer d'autres règles géométriques pour prouver que certaines classes de matrices d'adjacence ne peuvent pas donner un empilement de sphères physiquement valide. Par exemple, si les sphères i, j et k se touchent toutes les trois, elles doivent former un triangle équilatéral. Si le motif de 1 dans la matrice d'adjacence indique que plus de deux autres sphères touchent également i, j et k, alors la grappe ne peut pas exister dans un espace tridimensionnel. On peut ainsi éliminer les matrices non physiques sans même explorer la géométrie des grappes.

N. Arkus a également utilisé le kit *Geomag* *(voir la figure 5)* pour vérifier la faisabilité de certaines configurations. *Geomag* comporte des billes d'acier poli et des tiges aimantées enveloppées d'une gaine de plastique coloré ; toutes les tiges ont la même longueur, et on peut facilement les assembler en un squelette de liens de longueur 1 joignant des centres de sphères. C'est une aide précieuse pour l'intuition géométrique.

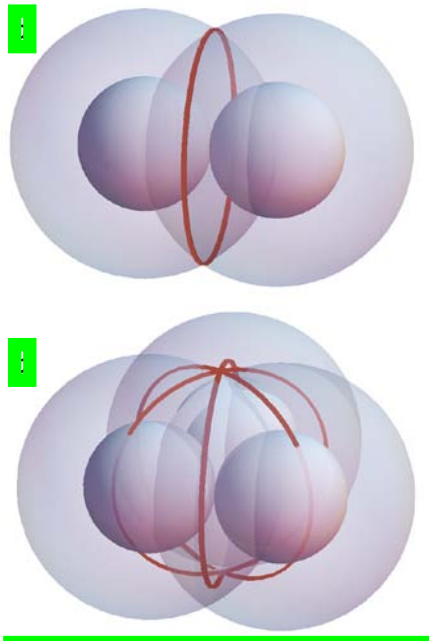
N. Arkus et ses collègues ont ainsi déterminé $\max(C_n)$, et identifié toutes les grappes réalisant ces nombres maximaux de contacts, pour tout $n \leq 10$ *(voir la figure 10)*. Ce faisant, ils ont découvert des grappes aux caractéristiques intéressantes.

Pour $n = 8$, le nombre maximal de contacts s'élève à 18, et il existe 13 façons différentes d'obtenir cette limite. Toutes ces grappes, sauf une, peuvent être obtenues par incrément en ajoutant une nouvelle sphère à la surface d'une des grappes de $n = 7$.

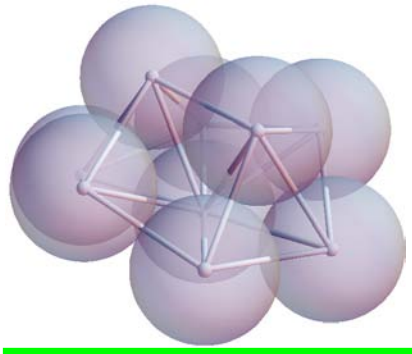
Les grappes de neuf sphères ($n = 9$) ont jusqu'à 21 contacts ; pour ce maximum, il en existe 52 variétés. Dans cette foule d'empilements, une structure se singularise, avec une propriété jusqu'ici inédite, la flexibilité : elle peut être tordue autour d'un axe sans casser de liens entre sphères. Cette capacité

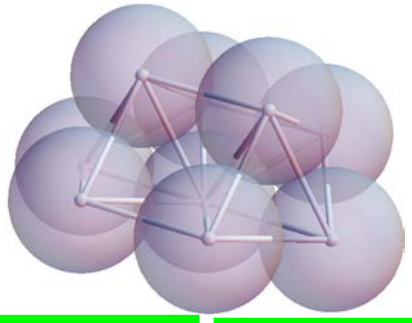


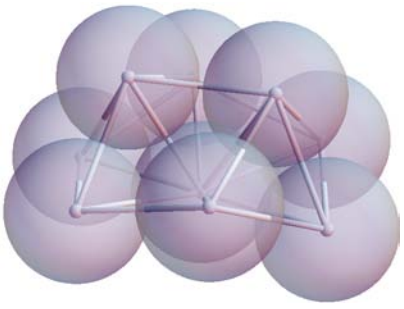
5. L'ENSEMBLE DES LIENS DE CONTACT entre sphères peut être résumé par un graphe, où les sommets représentent les sphères et les arêtes les contacts entre deux sphères. La même information est contenue dans la matrice d'adjacence *(à droite)*. Si i et j sont deux sphères quelconques de la grappe, l'élément de la ligne i et de la colonne j de la matrice vaut 1 si i touche j, et 0 sinon. Seul le triangle supérieur *(en mauve)* a besoin d'être spécifié : le triangle inférieur est son image en miroir.



6. SI DEUX SPHERES sont en contact *(a)*, une troisième sphère ne peut les toucher toutes deux que si son centre se trouve quelque part sur le cercle *(en rouge)* tracé par l'intersection des deux sphères de rayon double. De la même façon, avec trois sphères toutes en contact mutuel *(b)*, les positions disponibles pour ajouter une quatrième sphère se réduisent à deux points, aux intersections de trois cercles de rayon double.







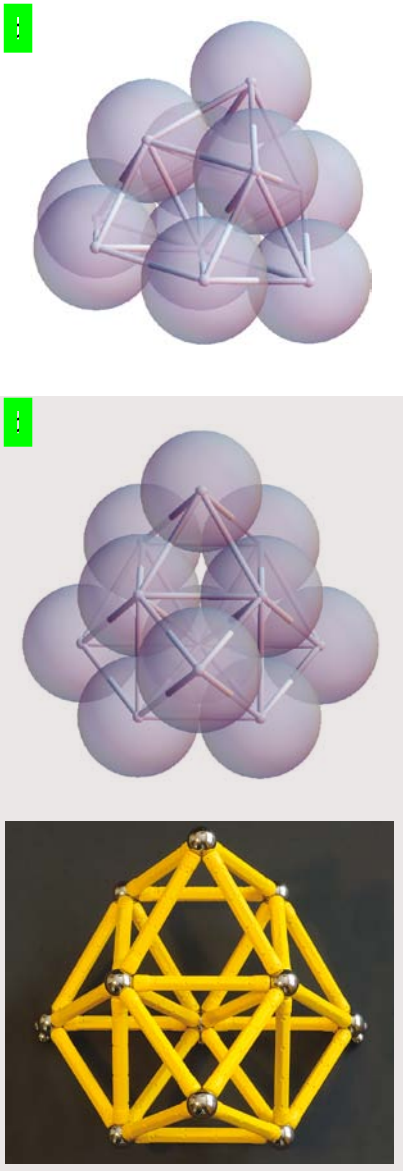
8. L'UNE DES 52 CONFIGURATIONS de neuf sphères qui maximisent le nombre de contacts a une propriété remarquable : elle est flexible. Deux morceaux de la structure peuvent se tordre dans des directions opposées sans qu'aucun contact entre sphères ne soit rompu.

se tortiller peut surprendre, sachant que es matrices d'adjacence ont été conçues vec l'objectif explicite de garantir une « rigidité minimale ». Mais ce n'est pas sans aison que cette forme de rigidité est dite minimale. L'exigence que chaque sphère oit en contact avec au moins trois autres mplique qu'aucune sphère individuelle ne peut bouger par rapport au reste de la grappe sans rompre au moins un contact. Mais d'autres modes de mouvement, où des groupes plus gros de sphères se plient ou tournent, ne sont pas exclus. Dans la grappe flexible $n = 9$, deux faces carrées accolées par une arête peuvent se tordre et se déformer légèrement *(voir la figure 8)*.

À l'assaut de $n = 10$ et 11

Quand $n = 10$, les grappes franchissent un autre seuil : pour la première fois, le nombre de contacts dépasse $3n - 6$ (soit, ici, 24). On a 259 agrégats de 10 sphères qui ont exactement 24 contacts, mais trois autres en ont chacun 25. Là encore, c'est un peu surprenant. L'algorithme de recherche part d'une liste de matrices qui spécifient exactement $(3n - 6)$ adjacences ; comment la recherche peut-elle mettre au jour une grappe ayant encore plus de contacts ? L'explication est que même si deux sphères n'ont pas l'obligation de se toucher, cela ne leur est pas interdit. Quand on résout un système d'équations spécifiant 24 adjacences, il peut se trouver, comme par coïncidence, que les sphères d'une 25e paire soient aussi séparées d'une distance exactement égale à un *(voir la figure 9a)*.

Pour compiler le catalogue des grappes de dix sphères, N. Arkus et ses collègues ont dû examiner plus de 750 000 matrices de structures de rigidité minimale. Le défi consistant à repousser la frontière jusqu'à $n = 11$ a été relevé par R. Hoy, J. Harwayne-Gidansky et C. O'Hern. Ils ont eu recours en grande partie aux mêmes méthodes, mais ils ont adopté une approche différente pour rationaliser les algorithmes.



9. UNE GRAPPE DE 10 SPHÈRES ayant 25 contacts *(a)* est construite à partir de la grappe flexible à 9 sphères en ajoutant une sphère à une des faces carrées (ce qui supprime la flexibilité). La championne des grappes à 11 sphères a 29 contacts *(b)*.

Par exemple, ces trois chercheurs de Yale ont supposé que tout empilement compact de sphères contient un chemin continu, non ramifié, qui traverse la structure de part en part, comme une longue chaîne de polymère. Cela implique que l'on peut toujours réarranger les lignes et les colonnes de la matrice d'adjacence de façon que la surdiagonale (juste au-dessus et à droite de la diagonale principale) soit entièrement constituée de 1. En se concentrant sur ces seules matrices, la charge de travail est réduite d'un facteur 1 000 pour $n = 11$.

Le groupe de Yale a également mis au point des règles simplifiées pour exclure les empilements non valides, et ont reformulé davantage de règles géométriques de façon à pouvoir tester les matrices sans devoir passer par les étapes laborieuses de calcul des distances entre paires de sphères. Pour $n = 11$, le groupe de Yale a ainsi identifié 1 641 grappes distinctes où $C_{11} \geq 27$ (la valeur $3n - 6$). La plupart de ces structures ont exactement 27 contacts ; mais 20 grappes ont 28 contacts, et il existe une grappe qui en a 29 *(voir la figure 9b)*.

Signalons que l'on peut facilement ajouter une 12e sphère à cette dernière grappe pour produire une structure à 33 contacts, soit $3n - 3$. Mais 33 est-il la valeur maximale de C_{12} ? On le saura quand Miranda Holmes-Cerfon, de l'Université de New York, aura publié ses récents travaux sur les grappes contenant jusqu'à 12 sphères.

Même pour $n = 11$, il est possible d'ergoter sur des questions de complétude et de certitude. Certains des résultats de l'équipe de Yale reposent sur un algorithme numérique pour résoudre le sys-

© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013

ème d'équations des distances. Comme on l'a déjà indiqué, la non-convergence de l'algorithme ne prouve pas qu'il n'existe pas de solution. En pratique, les risques de passer à côté d'un empilement valide sont très faibles ; selon la conception que l'on se fait de la rigueur, on estimera la question préoccupante ou non.

Des questions liées à des travaux de physique

Si l'équipe de Harvard comme celle de Yale se sont livrées à cet exercice, c'est par intérêt pour les agrégats de sphères matérielles plutôt que pour les sphères mathématiques. Le groupe de Yale se penche sur les mystères de la cristallisation. Dans leur masse, les matériaux tendent à privilégier les configurations qui maximisent la densité, comme l'empilement de Kepler. Mais la croissance des cristaux a pour point de départ des agrégats de quelques atomes seulement, pour lesquels les configurations qui minimisent l'énergie ne sont pas les mêmes.

N. Arkus s'intéresse à l'auto-assemblage dans les nanostructures, qu'elles soient naturelles (comme les capsides des virus) ou artificielles. Guangnam Meng de Harvard, en collaboration avec N. Arkus, M. Brenner et V. Manoharan, a développé un système expérimental qui offre un autre moyen d'explorer les petits amas de sphères collantes. Les sphères sont des billes de polystyrène d'un micromètre de diamètre, en suspension dans de l'eau et en présence d'une population plus importante de nanoparticules de plastique. Quand deux sphères se rapprochent, la présence des nanoparticules crée une attraction effective de courte portée entre les sphères, ce qui fait du système un bon modèle de sphères collantes.

Dans les expériences de G. Meng, on étalait les microsphères sur des plaques de verre comportant des milliers de micropuits cylindriques, où se formaient des grappes d'environ dix sphères par puits. Les puits étaient examinés au microscope pour évaluer les abondances relatives des différentes configurations. Si l'énergie potentielle était le seul critère, les grappes ayant davantage de contacts seraient plus nombreuses, mais l'entropie entre également en ligne de compte : les structures qui peuvent se former de nombreuses façons différentes sont plus probables. Pour l'essentiel, les résultats étaient à peu près en accord avec les attentes théoriques. L'entropie favorisait les grappes de symétrie inférieure, et augmentait aussi la proportion de structures non rigides. Mais parce que les contacts supplémentaires abaissent l'énergie potentielle, les structures ayant plus de $3n - 6$ contacts étaient également surreprésentées.

En dehors de ces applications physiques des sphères collantes, le dénombrement des contacts évoque un problème ouvert de mathématiques pures, posé en 1964 par le mathématicien d'origine hongroise Paul Erdős : étant donnés n points dans un espace de dimension d, combien de paires de points peuvent être séparées par la même distance ? On peut toujours s'arranger pour que cette distance soit égale à 1, et c'est pourquoi on parle parfois du problème de la distance-unité.

En trois dimensions, le problème du maximum de contacts pour des sphères est équivalent au problème de la distance-unité d'Erdős, avec la contrainte supplémentaire qu'aucune distance ne soit inférieure à 1. Ainsi, les résultats récents sur les sphères collantes résolvent cette version restreinte du problème pour tout $n \leq 11$.

Qu'y a-t-il au-delà de $n = 11$? D'après N. Arkus, le principal obstacle est le problème combinatoire consistant à engendrer toutes les matrices d'adjacence qui conviennent. Ces dernières sont si rares que le processus devient extrêmement inefficace. N. Arkus suggère une approche alternative, mais qui n'a pas encore abouti. Jusqu'à $n = 10$, elle a montré que toute grappe à $3n - 6$ contacts peut être convertie en n'importe quelle autre grappe à $3n - 6$ contacts par une chaîne de transformations simples, où une seule liaison est cassée et une autre formée. Elle fait l'hypothèse que cette propriété est vérifiée pour tout n. Si c'est le cas, le problème du maximum de contacts pourrait être résolu en produisant n'importe quelle structure à $3n - 6$ contacts, puis en parcourant systématiquement l'arbre de toutes les transformations constituées d'un simple échange de liaisons.

Quand n atteindra une valeur suffisamment grande, la diversité de ces curieuses structures géométriques commencera nécessairement à diminuer, puisqu'en grossissant, les grappes ressemblent de plus en plus à des morceaux d'empilements de Kepler. Mais nous n'en sommes pas encore là, et il pourrait y avoir encore bien des curiosités à découvrir. ■

n	$3n-6$	C_n	Multiplicité
1	0	0	1
2	1	1	1
3	3	3	1
4	6	6	1
5	9	9	1
6	12	12	2
7	15	15	5
8	18	18	13
9	21	21	52
10	24	24	259
		25	3
		27	1 620
11	27	28	20
		29	1

TABLEAU. CE TABLEAU RESUME ce que l'on sait à ce jour des grappes de n sphères collantes qui maximisent le nombre C_n de contacts. Jusqu'à $n = 4$, $\max(C_n)$ est égal à $n(n-1)/2$, le nombre de contacts formés quand chaque sphère touche chacune des autres sphères. De $n = 5$ à $n = 9$, $\max(C_n)$ est égal à $3n - 6$, le minimum pour avoir la stabilité mécanique. La « multiplicité » désigne le nombre de grappes différentes ayant la même valeur de C_n.

SUR LE WEB

Pour des figures de cet article en version animée, voir : www.americanscientist.org/issues/pub/2012/6/the-science-of-sticky-spheres/1

BIBLIOGRAPHIE

R. S. Hoy *et al.*, **Structure of finite sphere packings via exact enumeration : implications for colloidal crystal nucleation,** *Physical Review E*, vol. 85, 051403, 2012.

N. Arkus *et al.*, **Deriving finite sphere packings,** *SIAM Journal on Discrete Mathematics*, vol. 25(4), pp. 1860-1901, 2011.

R. S. Hoy et C. S. O'Hern, **Minimal energy packings and collapse of sticky tangent hard-sphere polymers,** *Physical Review Letters*, vol. 105, 068001, 2010.

N. Arkus *et al.*, **Minimal energy clusters of hard sphere with short range attractions,** *Physical Review Letters*, vol. 103, 118303, 2009.

N. J. A. Sloane *et al.*, **Minimal-energy clusters of hard spheres,** *Discrete and Computational Geometry*, vol. 14, pp. 237-259, 1995.

HISTOIRE DES SCIENCES

Guerre des fossiles en Patagonie

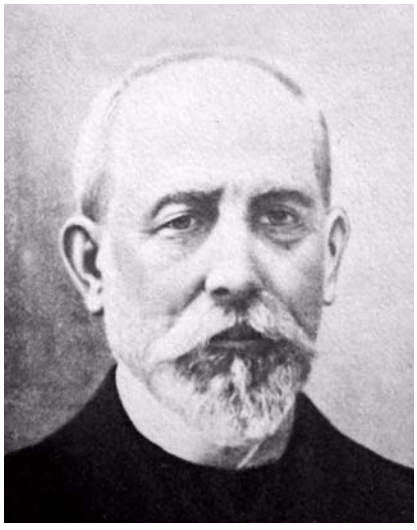
Dans les années 1890, une rivalité scientifique sans merci a été à l'origine des plus grandes collections paléontologiques de l'Argentine.

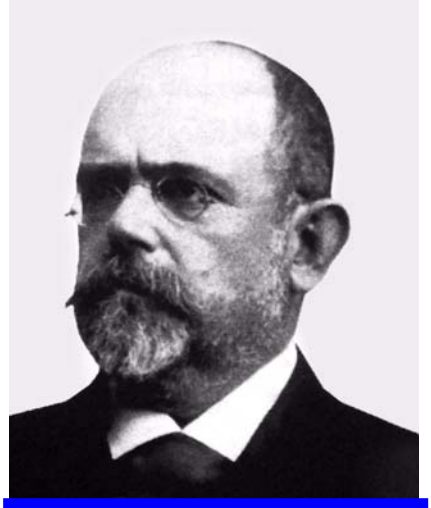
Eric Buffetaut

Un des épisodes les plus connus de l'histoire de la paléontologie est la féroce « guerre des os » qui opposa, à la fin du XIXe siècle, les paléontologues américains Edward Cope et Othniel Marsh. Souhaitant chacun être le premier à décrire les extraordinaires fossiles de dinosaures et de mammifères disparus que livrait l'Ouest américain, ils y engloutirent leurs fortunes personnelles. On sait moins que vers la même époque, une concurrence tout aussi acharnée opposa deux chercheurs argentins, lancés à la recherche des richesses paléontologiques de la Patagonie. Cette querelle a eu pour résultat de magnifiques collections de mammifères et d'oiseaux fossiles.

Les deux rivaux sud-américains se nomment Florentino Ameghino (1854-1911) et Francisco Moreno (1852-1919). Né peu après l'arrivée en Argentine de ses parents, émigrés italiens, Ameghino est autodidacte. Cela ne l'a pas empêché de se faire un nom dans la communauté paléontologique internationale, notamment lors d'un séjour à Paris de 1878 à 1881, d'où il a ramené une épouse, Léontine, et de précieux contacts. Doué d'une capacité de travail impressionnante, il fait progresser la connaissance des vertébrés fossiles argentins à un rythme étonnant.

Moreno, lui, est avant tout un explorateur. Dans les années 1870, il a effectué plusieurs voyages en Patagonie, alors que la région est encore mal connue et que les Indiens, qui apprécient peu les campagnes génocidaires de l'armée argentine, ne sont pas toujours accueillants. Son prestige s'est encore accru lorsqu'il a fourni une documentation géographique détaillée à l'appui des demandes de l'Argentine lors de l'arbitrage au sujet de la frontière contestée avec le Chili en Patagonie.





1. LES DEUX PROTAGONISTES de la guerre des fossiles qui débuta à la création du Museo de La Plata, en Argentine, à la fin du XIXe siècle : Florentino Ameghino *(en haut)* et Francisco Moreno *(en bas)*.

Dans les années 1880, les deux hommes sont réunis par un grand projet commun : le Museo de La Plata. En 1880, Buenos Aires est devenue la capitale fédérale de l'Argentine, formant un district séparé. Une ville est alors créée, La Plata, pour être la capitale de la vaste province de Buenos Aires. De nombreux édifices de prestige sortent de terre, dont un grand musée d'histoire naturelle et d'ethnographie. Moreno est l'instigateur de ce projet, qui vise à doter l'Argentine d'une institution scientifique comparable aux musées européens et nord-américains. Inauguré en 1887, le bâtiment, avec ses immenses galeries, ses superbes rotondes, ses bibliothèques et ses laboratoires, n'a rien à leur envier.

Les collections sont constituées des nombreux objets que Moreno a récoltés lors de ses explorations. Directeur, il a pour objectif de les accroître et d'en assurer l'étude scientifique. C'est ici qu'intervient Ameghino. Bien que renommé, le paléontologue n'a pas de poste officiel. Moreno lui en offre un, et non des moindres : il devient en 1886 sous-directeur du Museo de La Plata. En contrepartie, il cède au musée sa collection de fossiles, forte de quelque 40 000 spécimens. Un des frères de Florentino Ameghino, Carlos, est aussi embauché, en tant que naturaliste-voyageur. Carlos, l'homme de terrain de la famille, commence alors une longue série d'expéditions paléontologiques en Patagonie.

À cette époque, on sait déjà que les vastes contrées semi-désertiques du Sud

de l'Argentine sont riches en restes de vertébrés fossiles. Charles Darwin a été parmi les premiers à en récolter, en 1833, lors de son voyage à bord du *Beagle*. Et au cours d'un de ses périples, Moreno a trouvé en 1877, dans la région du Rio Santa Cruz à l'extrême Sud, des ossements de mammifères fossiles.

Mais ce que Carlos Ameghino découvre dépasse toutes les espérances. Les roches sédimentaires de la Patagonie révèlent une succession d'espèces inconnues. On ne le comprend pas encore, mais ces animaux, mammifères ou oiseaux géants, sont le résultat d'une évolution endémique, lorsque l'Amérique du Sud s'est trouvée isolée du reste du monde pendant des dizaines de millions d'années, au cours du Tertiaire. Ameghino et Moreno s'en félicitent : ces découvertes vont vite conforter le statut international du Museo de La Plata en suscitant l'intérêt des paléontologues du monde entier.

Toutefois, l'entente entre les deux hommes ne dure pas. Des tensions apparaissent entre ces deux fortes personnalités. Ameghino reproche à Moreno de ne pas publier assez vite ses travaux paléontologiques. Moreno publie les résultats d'Ameghino exclusivement dans des revues éditées par le Museo, pour augmenter la réputation du musée) et le taxe de mégalomanie. Il pose sa démission début 1888. Moreno réplique en le destituant et en lui interdisant l'accès aux collections paléontologiques, pourtant en grande partie l'œuvre des frères Ameghino. Carlos quitte aussi le musée. Dès lors, c'est la guerre.

Florentino Ameghino ne renonce pas à la recherche paléontologique, mais il ne dispose plus de ressources institutionnelles. Qu'importe, il s'autofinance. Pendant plus d'une décennie, il parvient non seulement à subsister, mais à couvrir les frais de son frère Carlos lors de nombreuses expéditions en Patagonie, souvent sur des mois entiers. Pour cela, il ouvre à La Plata une librairie-papeterie, qui s'ajoute à une autre tenue à Buenos Aires par son autre frère, Juan. De rares subventions complètent un peu le budget, et la vente de spécimens paléontologiques à des institutions européennes (surtout en Angleterre et en Allemagne) lui apporte des sommes plus importantes.

Cache-cache en terres hostiles

Dans ces conditions précaires, le dévoué Carlos se rend 14 fois en Patagonie et en rapporte des collections de fossiles extraordinaires, malgré les énormes difficultés rencontrées dans ces régions hostiles. Si les Indiens ne représentent plus guère de danger, le climat est rude, avec de fréquentes tempêtes de neige. Les contrées visitées sont désertes, et il faut emporter tout l'équipement et les vivres nécessaires, y compris l'eau parfois. Se procurer des chevaux est souvent difficile. Carlos passe ainsi des mois à arpenter les étendues désolées



2. L'UNE DES RARES PHOTOS DES PREMIERES EXPEDITIONS PALEONTOLOGIQUES EN PATAGONIE, ici au tout début du XX[e] siècle. Les deux hommes sont très probablement Carlos et Florentino Ameghino.

© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013

de la Patagonie, accompagné de quelques assistants recrutés sur place avec les maigres moyens que la librairie familiale lui octroie. Pour se repérer dans la nuit, il leur arrive d'allumer des feux de broussailles qui prennent parfois des proportions gigantesques et dangereuses. Mais les fossiles sont au rendez-vous, en telle abondance que Carlos ne peut tous les transporter. Il est alors contraint d'en enterrer à nouveau certains, pour les récupérer lors de son retour vers la côte, d'où d'occasionnels navires les emportent vers La Plata.

Il faut en effet les cacher, car les rivaux sont aussi présents en Patagonie. Moreno, qui n'a pas renoncé à développer les collections paléontologiques de son musée, envoie régulièrement ses hommes à la recherche de fossiles, parfois avec des moyens importants. Ainsi, en mars 1889, Carlos Ameghino ayant découvert des restes de dinosaures dans la province de Chubut, Moreno s'empresse d'y envoyer une expédition équipée d'une embarcation à fond plat, conçue dans les ateliers du musée pour transporter de lourds ossements. Le bateau remontera le Rio Chubut, tandis qu'un chariot robuste adapté au terrain local transportera les fossiles jusqu'au fleuve.

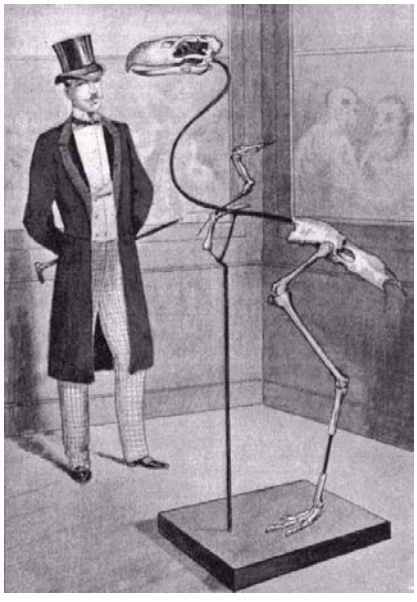
Pendant des années, les envoyés du Museo de La Plata ont ainsi joué à cache-cache avec Carlos Ameghino. Mais il ne suffit pas de découvrir des fossiles, encore faut-il les étudier. Florentino Ameghino a toutes les connaissances nécessaires, et son frère Carlos a aussi d'excellentes bases paléontologiques. Moreno, lui, est plus géographe que paléontologue. Il cherche donc un remplaçant à Ameghino. Son choix se porte d'abord sur Alcide Mercerat, un géologue suisse. Choix malheureux : la contribution de Mercerat à la science paléontologique est médiocre. Qui plus est, le caractère du personnage est pour le moins douteux. Son collègue du Museo de La Plata, le géologue Rodolfo Hauthal, le décrit comme « un homme d'une ignorance, d'une stupidité et d'une insolence sans égales ».

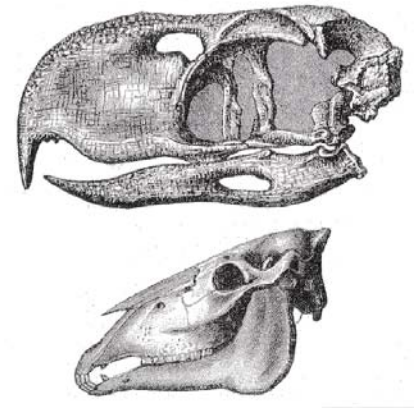
Mercerat ne restera pas longtemps au Museo de La Plata. En 1895, Carlos Ameghino annoncera dans une lettre à son frère Florentino que leur rival, établi en Patago-

L'AUTEUR



Eric BUFFETAUT est paléontologue au Laboratoire de géologie de l'École normale supérieure, à Paris (CNRS, UMR 8538).





3. DEUX REPRÉSENTATIONS des fossiles d'oiseaux géants découverts par les frères Ameghino destinées au grand public. L'une, parue en 1900 dans *La Nature*, donne une idée de leur taille *(en haut)*. L'autre compare leur crâne à celui d'un cheval *(en bas)*.

nie, a fait faillite et a été emprisonné pour escroquerie. Quoi qu'il en soit, au début des années 1890, Moreno et Mercerat se lancent dans une série de publications sur les vertébrés fossiles de Patagonie, destinées à devancer Ameghino qui, lui, travaille avec acharnement sur les spécimens récoltés par son frère. Un de leurs coups d'éclat est un imposant catalogue illustré des oiseaux fossiles de la République Argentine, publié en 1891. Ameghino, la même année, fait paraître des articles plus modestes sur le même thème, dans une revue qu'il a créée pour y publier ses découvertes.

Des oiseaux géants

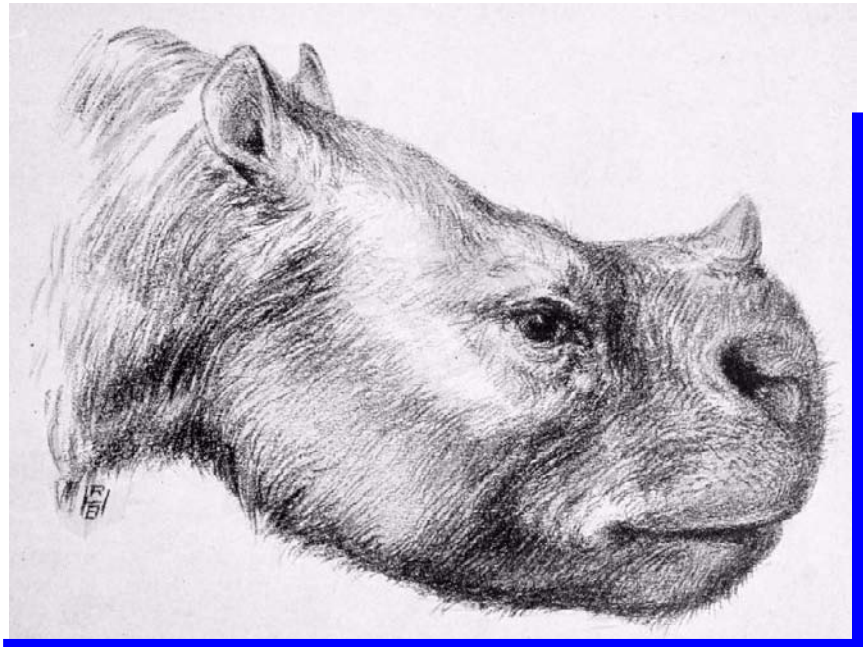
Il s'ensuit une controverse vigoureuse au sujet des dates de publication, chacun voulant établir la priorité des noms scientifiques qu'il a proposés. Mercerat reproche à Ameghino d'avoir menti sur les dates de parution de ses articles, accusation qu'il faut peut-être considérer avec prudence compte tenu de la réputation du paléontologue suisse. Mais il ne s'agit pas seulement d'une querelle de priorité. Les adversaires écrivent ce qu'ils pensent des travaux de leurs concurrents avec une franchise non dénuée d'agressivité.

Le mémoire de Moreno et Mercerat multiplie les critiques à l'égard d'Ameghino qui, il est vrai, a d'abord pris la mâchoire d'un grand oiseau, trouvée par son frère, pour celle d'un mammifère édenté. Ameghino réplique, affirmant que le catalogue de Moreno et Mercerat manque de valeur scientifique et ne fait que confirmer la mégalomanie du directeur du musée. Les descriptions sont souvent fondées sur des fossiles fragmentaires, mal illustrées, et le texte – une « interminable série d'erreurs » – ne vaut rien.

Les controverses sur les oiseaux fossiles de Patagonie dureront des années. Il faut dire que les découvertes de Carlos Ameghino et ses concurrents du Museo de La Plata comportent des fossiles spectaculaires, qui montrent que pendant le Tertiaire, l'Amérique du Sud était peuplée de grands oiseaux incapables de voler, certains dépassant deux mètres de hauteur. Ces Phorusrhacidés, ainsi que les a nommés Ameghino, diffèrent des grands oiseaux fos-

© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013

siles connus en Nouvelle-Zélande (les moas) et à Madagascar (les æpyornis) qui, comme les autruches auxquels ils sont apparentés, avaient une petite tête et un régime végétarien. Les oiseaux géants sud-américains ont au contraire un bec énorme et crochu comme celui d'un rapace, et leurs pattes sont armées de griffes redoutables. Ils étaient sans doute de dangereux prédateurs, dans des milieux comptant peu de mammifères carnassiers. Dans les années 1890, ces Phorusrhacidés suscitent l'intérêt aussi bien des paléontologues que du grand public. Quand Ameghino, à court d'argent et plus intéressé par les mammifères, propose sa collection d'oiseaux fossiles au *British Museum* en 1896, ce dernier l'achète un bon prix.



4. RECONSTITUTION DU MAMMIFÈRE *LEONTINIA GAUDRYI*, découvert par Carlos Ameghino en Patagonie. Son frère Florentino dédia ce nouveau genre de mammifère fossile à sa femme, Léontine, en lui donnant son nom.

Réconciliation

Alors que s'ouvre le XX[e] siècle, la situation de la paléontologie en Argentine évolue. Attirés par les découvertes des rivaux de La Plata, des paléontologues étrangers commencent à parcourir la Patagonie pour y récolter des fossiles. Les frères Ameghino accueillent le jeune Français André Tournouër, qui envoie des collections considérables au Muséum de Paris. Son mentor, Albert Gaudry, consacre certains de ses derniers articles aux mammifères fossiles patagons. Il est l'un des premiers à comprendre qu'il s'agit de faunes endémiques ayant évolué dans l'isolement. La présence des paléontologues américains John Hatcher et Barnum Brown, en revanche, est moins bien acceptée, d'autant plus que Hatcher critique les conclusions d'Ameghino avec beaucoup moins de diplomatie que Tournouër.

Les situations respectives d'Ameghino et de Moreno changent aussi. En 1902, Ameghino est nommé directeur du Musée d'histoire naturelle de Buenos Aires. Il peut alors se consacrer à ses recherches et à ses théories favorites, qui placent (à tort) l'origine de tous les groupes majeurs de mammifères, y compris le genre humain, en Amérique du Sud. Lorsqu'il meurt en 1911, l'Argentine reconnaissante lui fait des obsèques nationales. Moreno, lui, a quitté la direction du Museo de La Plata en 1906, mécontent de sa fusion avec l'université locale. Il se consacre à la création des premiers parcs nationaux argentins jusqu'à sa mort en 1919.

Les relations entre les anciens rivaux se sont entre-temps apaisées, comme le montrent ces mots d'Ameghino, lors d'une conférence donnée en 1904 : « La quasi-totalité des espèces de mammifères disparus trouvées sur notre sol, qui, durant les deux dernières décennies, ont reçu une carte d'identité dans la patrie toujours fraternelle de la science, ont été découvertes, cataloguées et décrites par des explorateurs et des naturalistes argentins. »

Aujourd'hui, le souvenir d'Ameghino et de Moreno est honoré avec une égale ferveur en Argentine. Certes, la guerre des fossiles qu'ils se sont livrée a eu des conséquences négatives. Notamment, en attribuant à de nombreux mammifères et oiseaux fossiles, souvent à partir de spécimens insuffisants, des noms de genres et d'espèces redondants, ils ont introduit un beau chaos dans la nomenclature paléontologique. Néanmoins, demeurent les magnifiques collections récoltées, qui font la gloire des musées de La Plata et de Buenos Aires. ■

BIBLIOGRAPHIE

A. Casinos, **Un evolucionista en el Plata. Florentino Ameghino,** Fundación de Historia Natural Félix de Azara, 2012.

E. Tonni *et al.*, **Buscadores de fósiles. Los protagonistas de la paleontología en la Argentina,** Jorge Sarmiento, 2007.

F. Ameghino et C. Ameghino, **Reseñas de la Patagonia. Andanzas, penurias y descubrimientos de dos pioneros de la ciencia,** Continente, 2006.

G. G. Simpson, **Discoverers of the lost world,** Yale University Press, 1984.

© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013

La sélection de livres POUR LA SCIENCE

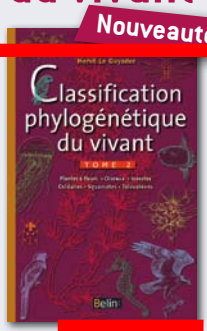
Ce mois-ci explorez, à votre guise, le monde du vivant avec des ouvrages qui font référence dans le domaine, ou les mathématiques à travers des livres riches en théories, images et anecdotes.

Classification phylogénétique du vivant

Tome 2

Guillaume Lecointre, Hervé Le Guyader

Nouveauté



Cet ouvrage très attendu vient compléter le tome 1, désormais une référence sur le sujet. Six grands groupes y sont présentés sur la base des connaissances les plus récentes : les plantes à fleurs, les oiseaux, les insectes, les lézards et serpents, les cnidaires et les poissons osseux.

Réf. 003458

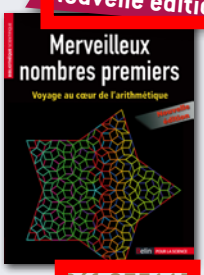
Editions Belin
508 pages – 39,90 euros – ISBN 978-2-7011-3456-2

Merveilleux nombres premiers

Voyage au cœur de l'arithmétique

Jean-Paul Delahaye

Nouvelle édition



Les nombres premiers fascinent. Connus dès les débuts de l'arithmétique, ils ont excité la curiosité de milliers de mathématiciens. Ils sont au cœur de la science des nombres, car tout entier se décompose de façon unique en un produit de facteurs premiers. Dans cet ouvrage, l'auteur mêle éclaircissements théoriques et anecdotes piquantes.

Réf. 025117

Editions Belin / Pour la Science
296 pages – 28 euros – ISBN 978-2-8424-5117-2

50 expériences pour épater vos amis au jardin

Jack Guichard, Kamil Fadel et Guy Simonin

Nouveauté



Voici 50 nouvelles expériences pour surprendre vos amis à la campagne ou sur votre terrasse : marcher sur l'eau, tirer la nappe sans faire tomber ce qui est sur la table, créer un double arc-en-ciel, transpercer un ballon sans qu'il explose ! Des expériences faciles à réaliser avec du matériel simple et la façon de réussir à coup sûr. Et aussi des compléments scientifiques et des indications sur les lieux où l'on peut observer ces phénomènes à grande échelle.

Réf. 090618

168 pages – 18,90 euros – ISBN 978-2-7465-0618-3



La logique, un aiguillon pour la pensée

Jean-Paul Delahaye

La logique a connu d'incroyables progrès depuis deux siècles : l'incomplétude de Gödel et l'indécidabilité de Turing ; la troublante loi de Benford ; les étranges hyper-ensembles, etc. Cet ouvrage sur la logique moderne des sciences intéressera autant mathématiciens que philosophes et curieux intrigués par le monde abstrait des raisonnements.

Réf. 025168

Editions Belin / Pour la Science
200 pages – 22 euros – ISBN 978-2-8424-5115-8

Eloge de l'erreur

Laurent Degos

Nouveauté



Nous construisons un monde nouveau dont nous découvrons les règles et auquel nous devons donner un sens. La multiplication des règles, protocoles, sanctions et procédures ne nous y aide pas. Sans l'erreur, moteur de l'évolution et de l'adaptation dans la vie comme dans la société, nous risquons de nous figer tandis que le monde continuera ses perpétuelles métamorphoses. Le tout est de savoir accepter l'erreur tout en minimisant les risques connus et attendus...

Réf. 090650

Editions Le Pommier
128 pages – 12 euros – ISBN 978-2-7465-0650-3

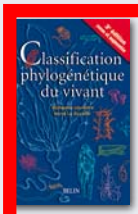
En partenariat avec les éditeurs

Belin ÉDITEUR INDÉPENDANT DEPUIS 1777

Le Pommier

Tous ces livres sont également disponibles en librairie.

LA SÉLECTION POUR LA SCIENCE C'EST AUSSI...



Classification phylogénétique du vivant

Tome 1 – 3e édition

Guillaume Lecointre, Hervé Le Guyader

Réf. 004273

Savez-vous que vous êtes plus proches d'un bolet que d'une pâquerette ? Que les crocodiles sont plus proches des oiseaux que des lézards ? Ce livre, très illustré, présente l'arbre de la vie et une synthèse des connaissances sur le sujet.

Éditions Belin
960 pages – 43 euros – ISBN 978-2-7011-4273-9

Comprendre et enseigner la classification du vivant

Guillaume Lecointre (dir.)



Réf. 004298

Cette seconde édition revue et augmentée du livre de référence pour l'enseignement de la classification du vivant propose un rappel synthétique des connaissances essentielles, ainsi que des outils pédagogiques développés à partir de collections rigoureusement sélectionnées d'organismes vivants.

Éditions Belin
960 pages - 27,90 euros – ISBN 978-2-7011-4298-2

Guide critique de l'évolution

Guillaume Lecointre (dir.)

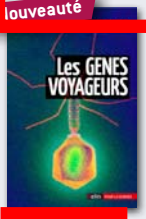


Éditions Belin
976 pages – 36,05
ISBN 978-2-7011-4797-0
Réf. 004797

Les gènes voyageurs

Éric Bapteste

Nouveauté



Réf. 005885

L'ADN est doué d'une incroyable capacité à se déplacer, sautant souvent d'un organisme vivant à l'autre. L'ouvrage montre en quoi ces nouvelles connaissances modifient profondément notre vision de l'évolution. Le lecteur y découvrira les nouvelles idées sur les origines du monde vivant et son devenir.

Éditions Belin/Pour la Science
192 pages – 19,50 euros – ISBN 978-2-7011-5885-1

Vive l'AGRO-RÉVOLUTION française !

Vincent Tardieu



Réf. 005923

Alors que la Terre comptera 9 milliards de bouches à nourrir en 2050, nombreux sont ceux qui pensent qu'il n'y a pas d'alternative à l'agriculture chimique et industrielle. Et pourtant... Oui, on peut nourrir la planète tout en préservant l'environnement ! Oui, nos paysans peuvent vivre mieux et être plus nombreux !

Éditions Belin
480 pages – 22 euros – ISBN 978-2-7011-5923-2

Galois, le mathématicien maudit

Norbert Verdier



Éditions Belin / Pour la Science
144 pages – 18,25 euros
ISBN 978-2-8424-5112-7
Réf. 025112

Mathématiques pour le plaisir

Jean-Paul Delahaye



Éditions Belin / Pour la Science
208 pages – 25,40 euros
ISBN 978-2-8424-5104-2
Réf. 025104

Pour commander ces ouvrages renvoyez le bon de commande ci-dessous

ou connectez-vous sur **www.pourlascience.fr/librairie**
(sauf références signalées par un * sur www.editions-belin.fr)

BON DE COMMANDE

POUR LA SCIENCE

Retournez accompagné de votre règlement à : Groupe Pour la Science – 8/38 avenue du Stade de France – ZAC Nord – 93210 Saint-Denis La Plaine Cedex – 60 Vineuil • Tél. : 0 805 655 255 • e-mail : pourlasciencevpc@daudin.fr

❑ Oui, je commande les livres présentés dans la sélection de *Pour la Science*. Je reporte les titres, prix et références à 6 chiffres correspondant aux ouvrages choisis :

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

J'indique mes coordonnées

Nom :
Prénom :
Adresse :
C.P. : Ville
Pays : Tél.
E-mail : @

Je choisis mon mode de règlement

❑ par chèque à l'ordre de *Pour la Science*
❑ par carte bancaire
Numéro
Date d'expiration
Cryptogramme

Signature obligatoire

DPL422 Offre

Belin ÉDITEUR INDÉPENDANT DEPUIS 1777 – Le Pommier

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

LOGIQUE & CALCUL

Qu'est-ce qu'un objet complexe ?

La profondeur logique de Bennett, notion proposée il y a 35 ans, nous rapproche d'une compréhension scientifique de l'idée de complexité.

Jean-Paul DELAHAYE

Les différentes étapes de l'évolution de l'Univers décrites par la cosmologie semblent montrer qu'il se « complexifie ». De même, les écosystèmes terrestres comportent des éléments de plus en plus nombreux et variés interagissant de façon toujours plus subtile et délicate. À une échelle de temps plus réduite, on évoque la « complexification » des sociétés humaines, des échanges sociaux et commerciaux, des objets technologiques et des théories scientifiques. Mais qu'est-ce qui augmente quand on parle de complexité croissante ? Peut-on mesurer cette « complexité » ?

Nombre d'idées ont été proposées pour définir et évaluer la complexité des objets, des processus et des interactions. L'une des propositions, la profondeur logique de Charles Bennett, retient l'attention générale. Grâce à des résultats accumulés depuis son introduction en 1977, elle constitue la piste la plus sérieuse pour une définition scientifique robuste de complexité structurelle ou de richesse en organisation. La mise au point d'outils qui, dans certains cas, la mesurent, permet d'envisager des applications.

Sans surprise, la théorie du calcul est au cœur de la définition proposée par Ch. Bennett, physicien américain connu pour ses recherches en mécanique quantique et en thermodynamique. Qu'un physicien ait recouru à la théorie du calcul suggère que la formulation de Ch. Bennett, qui s'appuie sur la notion de programme, s'impose et n'est pas juste une façon pour les informaticiens de se hausser du col !

Selon la vision de Ch. Bennett, la complexité structurelle d'un objet (qu'il dénomme profondeur logique) est la longueur du calcul, mesurée en cycles de machine ou plus généralement en ressources de calcul (temps, mémoire ou parallélisme), nécessaire pour qu'un programme court en produise une description explicite et détaillée.

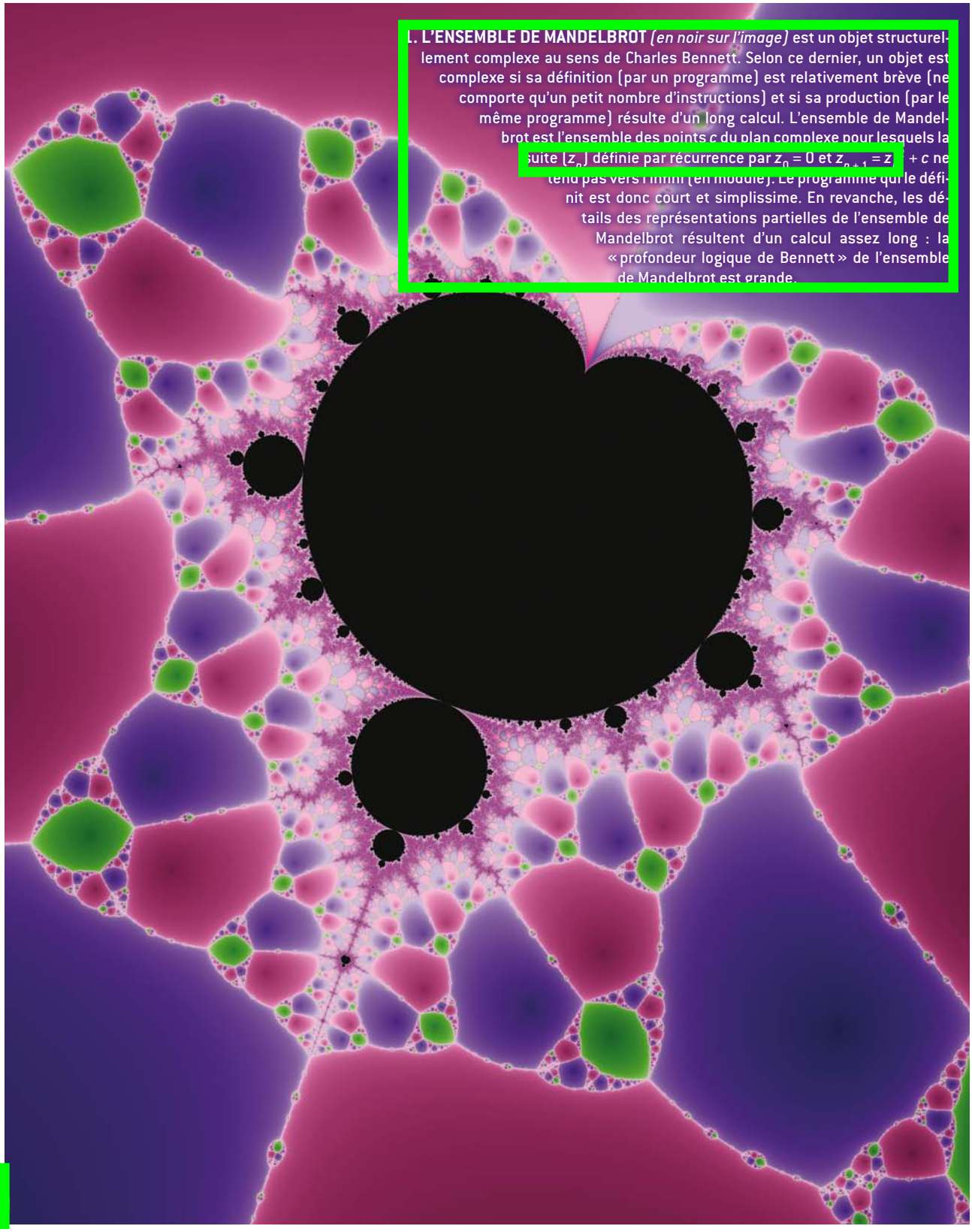
Le résultat d'un programme court, mais d'un long calcul

Quand la description complète d'un objet est produite rapidement par un programme court (comportant peu d'instructions), les objets ne sont pas complexes. C'est le cas par exemple pour un bloc de cristal, où le même motif élémentaire – la maille – se répète dans toutes les directions. C'est aussi le cas d'une suite numérique périodique comme 010101...01 (un million de fois). Ces deux objets ne sont pas complexes. Les objets de structure simple possèdent des programmes minimaux courts et ceux-ci produisent leurs résultats sans mettre en œuvre d'importantes ressources de calcul. De tels objets ont une faible « profondeur logique de Bennett ».

Il existe une seconde catégorie d'objets pauvres en structures. Une suite s indiquant le résultat d'un million de tirages à pile ou face est faiblement organisée et n'est donc pas structurellement complexe. Un programme court qui en permet l'écriture sera nécessairement de la forme « imprimer *s* ». Un tel programme s'exécute lui aussi rapidement, car il ne contient aucune boucle ou partie longue à faire fonctionner. Un objet purement aléatoire aura donc une faible profondeur logique de Bennett.

Pour être authentiquement organisé ou structurellement complexe, un objet doit pouvoir être décrit assez brièvement par un programme, ou quelque chose qui y ressemble, dont le fonctionnement est long. On a des raisons de croire que c'est le cas d'un microprocesseur, d'une ville, d'un mammifère, qui sont parmi les objets les plus structurellement complexes que nous connaissons.

Lorsqu'on attribue une grande complexité structurelle à un objet, c'est qu'on voit ou croit voir en lui les traces d'une longue histoire causale assimilable à un calcul. Cette histoire y a forgé les relations qu'entretiennent ses différentes parties et qui constituent sa complexité d'organisation. Si l'on accepte l'idée qu'il est beaucoup plus probable que l'objet qu'on qualifie de structurellement complexe provienne d'une dynamique longue, mais définissable assez simplement, plutôt que d'un processus bref qui l'aurait engendré par chance, alors l'idée de Ch. Bennett de prendre en compte le temps de calcul des programmes les plus



L'ENSEMBLE DE MANDELBROT *(en noir sur l'image)* est un objet structurellement complexe au sens de Charles Bennett. Selon ce dernier, un objet est complexe si sa définition (par un programme) est relativement brève (ne comporte qu'un petit nombre d'instructions) et si sa production (par le même programme) résulte d'un long calcul. L'ensemble de Mandelbrot est l'ensemble des points c du plan complexe pour lesquels la suite (z_n) définie par récurrence par $z_0 = 0$ et $z_{n+1} = z_n^2 + c$ ne tend pas vers l'infini (en module). Le programme qui le définit est donc court et simplissime. En revanche, les détails des représentations partielles de l'ensemble de Mandelbrot résultent d'un calcul assez long : la « profondeur logique de Bennett » de l'ensemble de Mandelbrot est grande.

© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013

courts qui engendrent l'objet apparaît naturelle et conforme au bon sens.

Avant de préciser comment l'idée de Ch. Bennett se traduit mathématiquement, formulons encore un argument en sa faveur à l'aide d'une expérience de pensée. Imaginez que l'on découvre, écrits sur un tronc d'arbre, un milliard de chiffres binaires consécutifs du nombre π matérialisés par des traits longs (pour les 1) et courts (pour les 0). Que faut-il raisonnablement en penser ?

(a) Que cette suite, qui n'en est qu'une parmi $2^{1\,000\,000\,000}$ autres de même longueur, se trouve là par hasard, du fait des intempéries ou du travail aveugle de quelques insectes. Ce serait par pure chance que les traits écrivent un milliard de chiffres binaires de π.

(b) Qu'un processus particulier, physique ou impliquant des humains et un ordinateur, a effectué le calcul de ce milliard de chiffres, qui a ensuite été recopié là. Dans ce cas, l'origine des chiffres serait attachée à un programme assez court ou, ce qui revient au même, à quelques lois physiques dont la description serait brève comparée au milliard d'éléments inscrits sur le tronc d'arbre.

Si vous optez pour *(a)*, vous choisissez une conception proche de celle des biologistes d'avant Pasteur, qui défendaient l'idée de la génération spontanée, soutenant par exemple que des rats naissent parfois d'un tas de chiffons humides abandonnés sans qu'aucun rat n'y soit préalablement passé. L'hypothèse *(b)* correspond à l'idée plus raisonnable, du moins aux yeux de la science moderne, que l'origine des rats dans un tas de chiffons est la même que celle des autres rats : ils sont nés de leurs parents, et sont, comme eux, le produit de l'évolution biologique qui, depuis plus de trois milliards d'années, a élaboré des formes vivantes aux structures de plus en plus riches et délicates. Cette évolution fonctionne selon les lois de la physique et de la chimie, lesquelles font interagir les atomes et molécules, et ces interactions sont assimilables à un calcul.

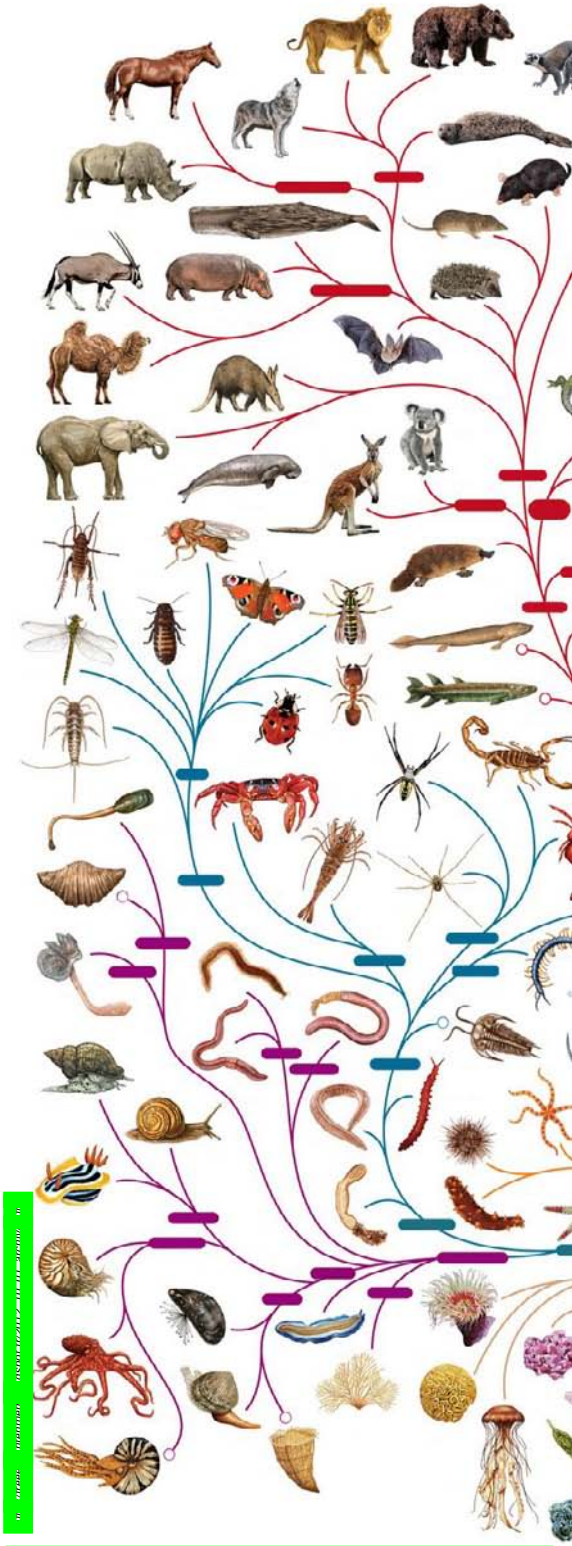
Pour les rats du tas de chiffons, comme pour le milliard de chiffres de π de notre expérience de pensée, la complexité structurelle provient de toute évidence d'un processus causal long, mais définissable assez brièvement. En termes informatiques, on dira que ces objets sont le résultat du calcul « d'un programme court ayant fonctionné longuement ». À la condition d'adopter une conception large de ce qu'est un calcul, l'idée de Ch. Bennett correspond à l'option *(b)* et elle est donc naturelle. Cette façon large de concevoir le calcul est assez facile maintenant, puisque les développements de l'informatique nous montrent au quotidien que tout processus dynamique peut être simulé par un calcul (ou, à l'inverse, peut être un moyen d'opérer des calculs).

Définition mathématique

L'idée générale de Ch. Bennett est rendue mathématiquement précise de plusieurs façons, dont les plus élémentaires conduisent aisément à des théorèmes. La première version mathématique de la définition de Ch. Bennett consiste à poser que la profondeur logique $P(s)$ de la suite finie s de 0 et de 1 (tout objet physique de taille finie se ramène, par numérisation, à une telle suite) est le temps de calcul (mesuré en nombre de pas de calcul) que le programme le plus court (on le note s^*) qui produit s met pour fabriquer s (s'il existe plusieurs programmes de même taille, on choisit le plus rapide).

Bien sûr, le temps de calcul dépend du langage de programmation utilisé. Cependant, à la condition de choisir un langage assez général (et ceux utilisés en informatique le sont : *C, Java, Basic, Python*, etc.), la définition de la complexité structurelle proposée par Ch. Bennett varie peu. Cette invariance est bien évidemment centrale et, grâce à elle, la notion de profondeur logique peut être prise au sérieux.

La détermination du plus court programme s^* engendrant s est très difficile et ne réussit pas toujours ! Ce n'est pas très étonnant, car les logiciens ont montré que le passage de s à s^* est non calculable : il n'existe aucun algorithme permettant, pour toute suite s, de connaître le programme s^* et son temps de calcul $P(s)$. Cette indécidabilité algorithmique provient de celle



2. LES OBJETS AYANT UNE RICHE ORGANISATION ne surgissent pas de rien et, selon Charles Bennett, ils vérifient une « loi de croissance lente ». Il faut une longue suite de causalités, assimilables à de nombreux calculs, pour engendrer ou décrire de tels objets. Ch. Bennett a démontré que la

© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013



rofondeur logique d'un système en évolution vérifie la loi de croissance lente (d'après laquelle la complexité structurelle ne peut augmenter rapidement), ce qui constitue un argument fort en faveur de sa définition. Cette idée s'appliquerait en particulier à l'évolution des organismes vivants.

démontrée en 1936 par Alan Turing et qui concerne l'arrêt des programmes : aucune méthode d'analyse ne permet de savoir à l'avance si un programme va se mettre à boucler.

Cependant, il ne faut pas tirer de cette impossibilité d'un calcul exact systématique pour tout s de $P(s)$ la conclusion qu'on ne peut pas évaluer $P(s)$. Les algorithmes de compression de données sont des outils qui calculent des versions approchées de s^* et leur utilisation permet l'évaluation de $P(s)$.

De la même façon, la complexité de Kolmogorov de la suite s, qui est la longueur (mesurée en bits) de s^*, n'est pas calculable, mais, grâce aux algorithmes de compression de données, elle est évaluable. Cette possibilité a permis des avancées dans la classification automatique des textes, des partitions musicales et des séquences génétiques. La non-calculabilité n'est pas un obstacle rédhibitoire : nous faisons des mathématiques tout en sachant qu'il n'y a pas de système parfait d'axiomes qui élimine toutes les propositions indécidables.

Complexité aléatoire et complexité structurelle

La complexité de Kolmogorov d'une suite, notion très importante en informatique théorique (et maintenant en physique et en biologie), ne pouvait pas mesurer la complexification évoquée en cosmologie et en biologie. En effet, une suite aléatoire où chaque élément est tiré à pile ou face a une complexité de Kolmogorov maximale (parmi les suites de même longueur) alors que, nous l'avons déjà remarqué, aucune structure n'y est présente en général.

La complexité de Kolmogorov mesure le « contenu en information » d'une suite s, c'est-à-dire la quantité minimale d'information qu'il faut mémoriser pour être capable de reproduire s (même si cette information est sans intérêt, comme c'est le cas pour une suite de tirages à pile ou face). La complexité structurelle, que la profondeur logique de Bennett veut évaluer, est liée à la richesse d'organisation, au nombre de corrélations et d'interactions apparentes ou cachées entre parties de s, à la quantité d'interdépendances des parties, toutes choses absentes dans une suite aléatoire de 0 et de 1.

Cette distinction que nous faisons tous sans en avoir nécessairement conscience entre complexité aléatoire (ou contenu incompressible d'information que mesure la complexité de Kolmogorov, la taille de s^*) et complexité structurelle (celle que Ch. Bennett veut évaluer, et qui en première approximation est le temps de calcul de s^*) est essentielle pour que puisse progresser une théorie générale de la complexité. C'est faute de l'avoir comprise plus tôt et de s'être aperçu que l'impossibilité d'un calcul exact des versions formelles de ces notions (complexité de Kolmogorov et profondeur logique) n'interdisait pas de les utiliser, que l'on a cherché – et que l'on cherche encore parfois – à formuler des définitions particulières de la complexité qui ne s'appliquent que dans des contextes limités.

Des versions mathématiques plus avancées de la profondeur logique de Bennett ont été proposées. Elles ne se contentent pas de faire intervenir le programme le plus court produisant s, mais tous les programmes produisant s qui ne peuvent être compressés de plus de k bits ou même tous les programmes produisant s, mais en accordant plus de poids aux programmes les plus courts qui sont considérés comme des origines plus probables de l'objet s. Ces versions ont de meilleures propriétés que $P(s)$, dont celle d'autoriser la démonstration d'une « loi de croissance lente » (la complexité structurelle ne peut pas croître rapidement). Malheureusement, ces définitions sont plus délicates à mettre en application que la définition de base $P(s)$.

Une série d'avancées dans la compréhension et l'utilisation de la profondeur logique de Bennett ont eu lieu depuis sa définition en 1977. Il faut les voir comme la confirmation que l'idée de Ch. Bennett est pertinente et que, même si rien n'est très facile dans ce domaine soumis à de nombreuses « indécidabilités », il faut poursuivre son étude. La profondeur de Bennett, ne serait-ce que d'une manière abstraite, nous aide à mieux cerner la complexité dont notre compréhension intuitive

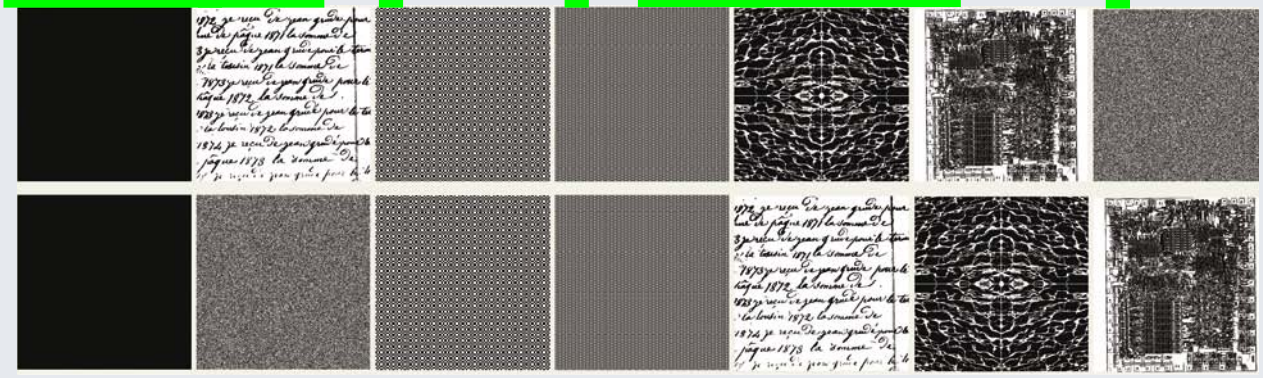
© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013

Évaluation expérimentale de $K(s)$ et $P(s)$

Un programme de compression de données permet d'évaluer la complexité de Kolmogorov et la profondeur logique de Bennett. La version compressée d'un fichier doit être vue comme un court programme engendrant le fichier : sa taille indique une valeur approchée de la complexité de Kolmogorov, et le temps nécessaire à la décompression du fichier est assimilable au temps de calcul pour reproduire le fichier initial, donc à une évaluation de sa profondeur logique. Les expériences ont été réalisées par Hector Zenil, Cédric Gaucherel et l'auteur (J.-P. Delahaye).

Sept images de même format ont été compressées avec un algorithme de compression sans perte : l'image retrouvée après décompression est exactement celle avant compression. La première série indique le classement des images par ordre croissant de taille du fichier compressé, donc par complexité de Kolmogorov $K(s)$ croissante. Sans surprise, on trouve que l'image toute noire *(image 1)* a le contenu en information le plus petit, et que l'image composée de pixels tirés aléatoirement *(image 7)* est celle qui exige la plus grande quantité de mémoire ($K(s)$ maximal). Les autres images sont classées à peu près comme on s'y attend : le manuscrit *(image 2)* demande assez peu de mémoire, car il y a beaucoup de blanc ; un réseau périodique *(image 3)* ; une courbe de Peano *(image 4)* ; une image irrégulière, mais avec deux axes de symétrie *(image 5)* ; un microprocesseur *(image 6)*.

La seconde série d'images reprend les mêmes sept images, mais cette fois par ordre croissant de temps de décompression, ce qui donne des valeurs approchées de la profondeur logique de Bennett $P(s)$, donc un classement par complexité structurelle croissante. L'image 7 du premier classement, qui est parfaitement aléatoire, est maintenant parmi les premières, conformément à l'idée qu'un hasard parfait est totalement sans structure. Le microprocesseur est bien identifié comme le plus complexe structurellement. La courbe de Peano est, sans surprise, toujours considérée comme contenant des structures un peu plus riches que le motif périodique. Le texte écrit et le motif symétrique changent de position, donnant au total un classement compatible à ce qui, intuitivement, correspond à une complexité structurelle croissante.



doit maintenant devenir mathématique et scientifique.

Parmi les tentatives de définition d'une mesure de complexité structurelle, certaines, issues de la théorie du calcul, sont différentes de celle de Ch. Bennett. Elles sont en compétition avec l'idée de Ch. Bennett et il est donc nécessaire de comprendre s'il s'agit de notions liées.

La notion de « sophistication » introduite par l'Israélien Moshe Koppel et le Français Henri Atlan, et la notion de « complexité effective » des Américains Seth Lloyd et Murray Gell-Mann se fondent sur l'idée d'une séparation possible entre la composante aléatoire et la composante organisée d'un objet. L'idée des définitions proposées par ces chercheurs sous des formes mathématiques qui en masquent parfois le côté naturel est la suivante. Quand on examine un programme produisant un objet, il est souvent possible d'y reconnaître deux parties : l'une représente ce qui fixe et décrit la structure de l'objet, l'autre est ce qui habille la structure par des éléments de moindre importance, voire aléatoires.

La partie non aléatoire

Considérons par exemple une suite finie de paires de chiffres binaires 00 ou 11 dont la succession est aléatoire :

s = 00 11 11 00 00 00 11 00 11 00 00 11 00 11 11. Le plus court programme s* produisant cette suite comportera deux parties assez faciles à identifier, car il sera de la forme : « Imprimer, en doublant chaque chiffre, la suite 011000101001011. »

La structure régulière de s est exprimée par la partie « Imprimer en doublant chaque chiffre ». La composante désordonnée se trouve, quant à elle, dans la partie descriptive et incompressible de 0 et de 1 qui termine le programme.

Lorsqu'on aura affaire à une suite s plus structurée que celle de notre exemple, la longueur de la partie non aléatoire sera supérieure. C'est cette longueur qui, selon M. Koppel, H. Atlan, S. Lloyd et M. Gell-Mann, mesure la richesse en organisation, la complexité structurelle de la suite s.

La partie du programme où l'on a inscrit la séquence 011000101001011 est d'autant plus longue que la séquence s comporte beaucoup d'éléments aléatoires. C'est la partie aléatoire de la séquence et sa longueur est, en gros, la complexité de Kolmogorov de s.

Des difficultés techniques rendent délicate la formulation mathématique de cette idée de séparation en deux parties d'un pro-

© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013

gramme court donnant *s*, mais ce que nous venons d'expliquer est l'essence de l'idée de la sophistication et de la complexité effective.

Ces définitions étant sans doute aussi naturelles que la définition de la profondeur logique de Bennett, la question était posée de savoir s'il existe un lien entre ces deux visions en apparence très différentes de la complexité structurelle. Une réponse a été donnée en 2010 dans un remarquable article de Nihat Ay, Markus Müller et Arleta Szkola, de l'Institut Max Planck de Leipzig. Ces chercheurs y établissent formellement qu'une grande complexité effective entraîne toujours une grande profondeur logique, confirmant donc le bien-fondé de la définition de Ch. Bennett.

Les recherches récentes ont conduit à un second progrès de la théorie, avec la mise au point de versions calculables de la profondeur logique. Ces versions font des hypothèses simplificatrices et restrictives sur les processus de calcul, mais aboutissent à des définitions débarrassées de la gênante incalculabilité de $P(s)$.

Un troisième motif de satisfaction pour ceux qui pensent que le concept de profondeur logique de Bennett ou les concepts voisins sont une clef pour comprendre le monde réel a été de le voir reconnu dans des travaux scientifiques liés à ce qui, dans le monde, est une sorte de grand calcul : l'évolution biologique.

Antoine Danchin, de l'Institut Pasteur, Guillaume Baptist, de l'Université de Grenoble, et John Collier, de l'Université de Durban en Afrique du Sud, défendent tous les trois indépendamment que la profondeur logique de Bennett permet d'éviter certaines considérations trop naïves sur la complexification des êtres vivants et éclaire l'idée d'un progrès dans les lignées d'organismes vivants, progrès qui ne serait que l'accumulation de résultats de calculs.

Divers travaux de nature expérimentale ont conduit à des débuts de validation pratique de l'idée de Ch. Bennett dont les fondements intuitifs ne font pas de doute, mais dont il restait à montrer qu'elle a aussi un potentiel d'application.

Un premier travail a consisté à mesurer vraiment le temps de calcul du plus court programme produisant une image. Il a été mené par Hector Zenil, de l'Université de Sheffield, Cédric Gaucherel, du Département d'écologie de l'Institut français de Pondichéry en Inde, et moi-même. La méthode évalue le temps de décompression nécessaire pour des images représentant divers objets plus ou moins structurés. Ce temps de décompression est assimilable à $P(s)$, car le fichier compressé de *s* est une version approchée de s^* et le calcul pour passer du fichier compressé au fichier complet est assimilable au calcul que s^* effectue pour produire *s*, c'est-à-dire $P(s)$.

Expérimentations

Les résultats de ces mesures de temps de calcul ont été utilisés pour ordonner les images par complexité structurelle croissante *(voir l'encadré page ci-contre)*. La classification obtenue est proche de celle attendue, avec au début les images parfaitement simples ou totalement aléatoires, et à la fin du classement les images des objets les plus riches en structures.

Un second travail fondé sur l'énumération massive de petites machines de Turing a été mené par Fernando Soler-Toscano, de l'Université de Séville, H. Zenil, Nicolas Gauvrit, de l'Université Paris VII, et moi-même. Il a permis d'évaluer la complexité de Kolmogorov et la profondeur logique de Bennett pour de courtes séquences de 0 et de 1. Ces calculs montrent, comme on s'y attendait, que les deux notions de complexité sont indépendantes et que la profondeur logique de Bennett est faible aussi bien pour les suites simples (dix fois 0, par exemple) que pour les suites d'apparence aléatoire.

L'idée de la complexification, objet de nombreux commentaires et d'autant de spéculations, devient ainsi un thème scientifique et mathématique fondé sur une théorie générale rigoureuse et qui, dans les cas les plus simples, produit des outils de mesure. On peut même rêver d'aboutir à une compréhension théorique profonde du développement de la complexité de l'Univers et du vivant, qui rendrait définitivement caduques les élucubrations des créationnistes et de l'*Intelligent Design*. ■

L'AUTEUR



J.-P. DELAHAYE est professeur à l'Université de Lille et chercheur au Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille (LIFL).

BIBLIOGRAPHIE

H. Zenil, J.-P. Delahaye et C. Gaucherel, **Image characterization and classification by physical complexity**, *Complexity*, Vol. 17(3), pp. 26-42, 2012.

N. Ay *et al.*, **Effective complexity and its relation to logical depth**, *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol. 56, pp. 4593-4607, 2010.

J.-P. Delahaye, **Complexité aléatoire et complexité organisée**, Quæ, 2009.

Ch. Bennett, **Logical depth and physical complexity**, dans *A Half-Century Survey on the Universal Turing Machine*, pp. 227-257, Oxford University Press, 1988.

M. Koppel, **Complexity, depth, and sophistication**, *Complexity*, Vol. 1, pp. 1087-1091, 1987.

SUR LE WEB

F. Soler-Toscano *et al.*, **Correspondence and independence of numerical evaluations of algorithmic information measures**, 2012 : http://arxiv.org/abs/1211.4891

Ch. Bennett, **What increases when a self-organizing system organizes itself ? Logical depth to the rescue**, 2012 : http://dabacon.org/pontiff/?p=5912

P. Grassberger, **Randomness, information, and Complexity**, 2012 : http://arxiv.org/abs/1208.3459

SCIENCE & FICTION

Fascinants cousins

Les primates sont fréquents en science-fiction, bons ou méchants selon les auteurs, souvent géants. Peut-on établir une phylogénie de ces primates, fruits de l'imagination ?

J. Sébastien Steuer et Roland Lehoucq

« Ôte tes mains, sale humain » avertit le colonel Attar, puissant gorille dans la version de 2001 de *La Planète des singes* de Tim Burton. Ce renversement de situation résume bien le thème central du roman éponyme de Pierre Boulle (1963). Grand classique de l'anticipation, ce roman décrit une Terre du futur où les singes ont pris le pouvoir, réduisant les humains au rang de fugitifs, de jouets ou d'esclaves.

Cette parabole, magnifiée à l'écran par les somptueux maquillages de John Chambers, nous renvoie le regard que nous posons sur nos cousins primates. Effet boomerang d'autant plus perturbant que les singes ont joué ou jouent encore, dans nos sociétés dites modernes, le rôle de « cobayes » pour la conquête de l'espace ou la médecine. Entre mutants surdoués et surpassant les hommes, ou monstres primitifs, violeurs de blondes ou dévoreurs d'aventuriers, les primates de la science-fiction ne refléteraient-ils pas nos peurs ancestrales et nos fantasmes ?

Darwin avait raison : l'homme ne descend pas du singe, il partage avec lui un ancêtre commun. Cette relation, qu'il consigne nommément dans *La Filiation de l'homme et la sélection liée au sexe* (1871), a transformé nos rapports avec les animaux en général et les autres primates en particulier. Elle met aussi en cause notre conception linéaire de l'évolution – qui va de la bactérie jusqu'à l'homme – pour la remplacer par une autre plus réaliste, buissonnante et aléatoire, dont il traite déjà en 1859 dans *De l'origine des espèces*. Rappelons que parmi tous les êtres vivants, les singes sont nos plus proches cousins : nous partageons avec les bonobos et les chimpanzés près de 99 pour cent de notre génome. À tel point que nous pourrions presque parler d'espèces sœurs. C'est bien cette proximité génétique qui en fait, hélas pour eux, d'excellents cobayes…



1. Dans *La Planète des singes : les origines* (Rupert Wyatt, 2011), des expérimentations médicales, réalisées sur des chimpanzés, tournent mal…

À qui la première place ?

Comment définir un primate ? Le terme a été créé en 1758 par Linné, naturaliste suédois et père d'une classification du vivant : il est issu du latin *primas* « celui qui occupe la première place », car l'homme était alors placé au sommet de l'échelle des êtres organisés. Le groupe comprend aujourd'hui environ 424 espèces de mammifères placentaires généralement couverts de poils (sauf sur le derrière), ayant des ongles, un pouce opposable, des yeux (dans ce groupe, la vision binoculaire est plus sollicitée que l'olfaction) ainsi qu'un assez gros cerveau.

Le groupe, autrefois plus diversifié, serait apparu juste avant ou après l'extinction des dinosaures non aviens. Parmi les primates, les orangs-outans (genre *Pongo*), gorilles (*Gorilla*), chimpanzés et bonobos (*Pan*) ainsi que les humains (*Homo*) sont regroupés dans la famille des hominidés – les trois derniers dans la sous-famille des

hominiinés. Notons que le genre *Homo* a été nommé en 1758 par Linné lui-même, bien avant le genre *Pan* (1816). Or, selon le principe d'antériorité (le premier genre nommé a priorité sur les autres), et en raison de la proximité entre ces espèces, chimpanzés et bonobos devraient s'appeler respectivement *Homo troglodytes* et *Homo paniscus*.

Si tel n'est pas l'usage, considérer le singe comme une autre humanité est pourtant assez fréquent en science-fiction : dans son roman *Congo*, Michael Crichton (1980) met en scène une nouvelle espèce de gorilles intelligents, au langage complexe et reclus dans la jungle africaine. Autre exemple : dans sa nouvelle *In The Abyss* (1896), H. G. Wells imagine également une civilisation de singes aquatiques, avec des ouïes au niveau des oreilles. Cette idée rappelle une théorie farfelue, mais très en vogue dans les années 1960, selon laquelle l'homme moderne aurait connu une phase en milieu marin ou côtier…

Quelle phylogénie pour King Kong ?

En science-fiction, nos cousins ont souvent des tailles et des proportions exagérées. Mais même le plus grand, King Kong, apparu pour la première fois en 1933 dans le film d'Ernest Schoedsack et Merian Copper, est doué de sentiments humains puisqu'il tombe amoureux de la belle Ann Darrow. En cela King Kong est une relecture du mythe de la belle et la bête. Mais, même si la taille, qui varie souvent d'un plan à l'autre, diminue au cours de l'histoire du cinéma, on peut se demander d'où vient ce gigantisme : dans un documentaire-fiction accompagnant le *remake* de 2005 de Peter Jackson, King Kong est décrit comme un genre et une espèce à part entière, *Megaprimatus kong*, qui dériverait du gigantopithèque.

Ce nom, s'il fait très scientifique, est-il réellement approprié ? Certes le gigantopithèque a bel et bien existé : il s'agit d'un primate fossile connu par des dents (dont les premières ont été découvertes chez un apothicaire chinois !), des mâchoires et quelques os exhumés en Asie du Sud-



2. LE GIGANTOPITHEQUE fut-il un cousin éloigné de King Kong ?

Est et en Inde, datés entre neuf millions d'années et 100 000 ans. Haut de quelque trois mètres, il serait à l'origine du mythe du yéti. Toutefois, le gigantopithèque serait plus proche de l'orang-outan que du gorille. King Kong n'a donc pas grand-chose à voir avec ce pithèque, contrairement au *Big Foot* nord-américain ou autre dérivé tout aussi imaginaire que le yéti.

Les proportions et la morphologie de Kong suggèrent tout simplement qu'il s'agit d'un gorille, sans doute le dernier représentant de formes géantes qui se seraient retrouvées isolées sur Skull Island. Dans ce contexte d'isolement géographique et génétique, nous proposons que King Kong soit nommé *Gorilla giganteus*. Un tel isolement peut en effet produire des formes aussi bien géantes (chez les rongeurs par exemple) que naines (tels les éléphants nains fossiles retrouvés sur les îles grecques – et dont le crâne, présentant une impressionnante fosse nasale, serait à l'origine du mythe du Cyclope). Mais il est vrai que l'on croise nombre de créatures anachroniques sur Skull Island, dont des dinosaures…

Si King Kong demeure le primate le plus célèbre de l'histoire, d'autres singes fantastiques, moins connus, méritent pourtant toute notre attention : c'est le cas de ces surprenants orangs-outans de l'espace inventés par l'agronome Pierre Boitard (1789-1859). Dans ses *Études astronomiques* (1838-1840), ce naturaliste créatif et avant-gardiste imagine pour la première fois à quoi pourraient ressembler les habitants du Système solaire. Il met en scène des espèces peuplant chaque planète selon l'échelle des êtres organisés adoptée à l'époque. Ainsi, de haut en bas de l'échelle, le Soleil est habité par de petits « superhumains » macrocéphales qui préfigurent les extraterrestres à grosse tête), la Terre par l'homme, Vénus par « une certaine figure de l'homme fossile », enfin Mercure est peuplée d'orangs-outans.

Du chef de guerre Attar de *La Planète des singes* aux primates extraterrestres de Boitard, nos cousins nous fascinent. Pour savoir pourquoi, il nous suffit de nous regarder dans un miroir ! ■

J.-S. STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. R. LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay. Avec la participation de Vilem Bischof, spécialiste en primatologie.

Retrouvez cet article sur www.pourlascience.fr

ART & SCIENCE

La crucifixion : un supplice énervant !

La position des crucifiés perturbe, entre autres, l'activité des nerfs de l'avant-bras et entraîne une disposition particulière des doigts que l'on retrouve dans la plupart des représentations artistiques.

Loïc MANGIN

En 71 avant notre ère, 6 000 esclaves furent crucifiés et alignés sur la *Via Appia* qui relie Rome à Cappoue. Le général romain Crassus entendait ainsi marquer sa victoire sur la revolte dirigee par le gladiateur thrace Spartacus. Cet épisode, relaté par l'historien Appien et rendu célèbre par le film éponyme de Stanley Kubrick en 1960, montre que le crucifiement était un supplice répandu chez les Romains. Il l'était déjà chez les Perses, qui l'auraient inventé au Ve siècle avant notre ère, mais aussi chez les Celtes, les Scythes, les Assyriens, les Phéniciens…

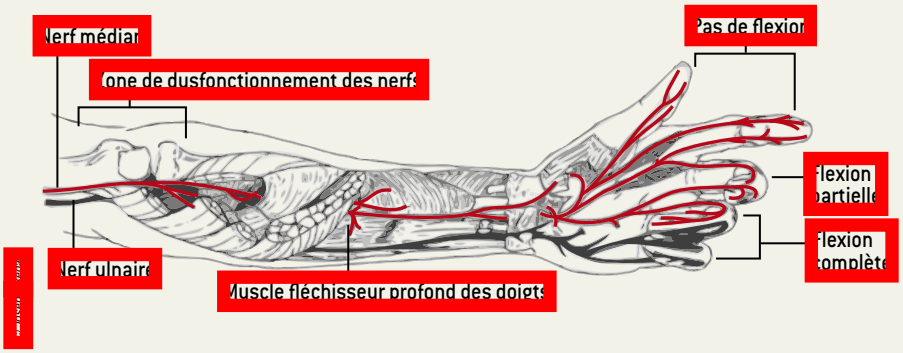
Le châtiment devint célèbre lorsqu'il fut la sentence prononcée par Ponce Pilate à l'encontre de Jésus : c'est plutôt dans ces circonstances que l'on parle de *crucifixion*. Certains situent la première représentation de la crucifixion dans les *Évangiles de Rabula*, un manuscrit enluminé de la fin du VIe siècle et conservé à Florence : c'est, en tout cas, la première scène complète figurant la plupart des protagonistes. D'autres observateurs ont vu des crucifixions dans des mosaïques orientales du IVe siècle, d'autres encore dans une petite plaque d'ivoire d'époque mérovingienne gravée au début du Ve siècle. Quoi qu'il en soit, la crucifixion a fait les riches heures de l'histoire de l'art : Mantegna, Raphaël, Velasquez, Dali…

Ce supplice a soulevé plusieurs questions. La victime meurt-elle d'asphyxie ou d'une défaillance cardiaque ? Des expériences menées en 1989 par Frederick Zugibe (des volontaires sont restés longtemps sanglés à des croix) n'ont pas permis de conclure. Les clous étaient-ils plantés dans la paume ou au niveau du poignet ? Des études archéologiques ont plaidé pour la seconde hypothèse : les clous étaient insérés entre le radius et le cubitus.

Une autre question a longtemps été délaissée. Elle concerne la position des doigts. En effet, sur de nombreuses crucifixions, notamment celle du Greco *(voir page ci-contre)*, on observe que le pouce et l'index sont tendus, l'auriculaire et l'annulaire complètement pliés, tandis que le majeur est dans une position intermédiaire. Cette disposition anatomique fut représentée la première fois à Constantinople, à la fin du VIIIe siècle. Comment l'expliquer ? S'agit-il d'une licence artistique – cette posture des doigts est celle utilisée par les prêtres lors de bénédictions – ou correspond-elle à une réalité biologique ? Jacqueline Regan, du Département de neurosciences de l'Hôpital *Inova Fairfax*, à Falls Church, aux États-Unis, et ses collègues ont répondu.

Un clou planté dans la paume ou dans le poignet, en endommageant les nerfs et les muscles à cet endroit, n'entraînerait pas une telle disposition des doigts. Selon les médecins, la cause est à chercher dans un dysfonctionnement des nerfs plus en amont dans le bras. Voyons comment.

Chez un crucifié, les bras forment chacun un angle d'environ 135 degrés avec l'axe du corps et subissent une rotation vers l'avant tandis que les coudes sont hypertendus. De plus, les bras supportent le poids de l'individu suspendu. Dans cette position, une contrainte mécanique importante s'exerce sur le nerf médian qui parcourt le bras *(voir la figure ci-contre)*. Cette contrainte se traduit par une diminution de l'afflux sanguin vers ce nerf, donc de son activité. Plusieurs expériences sur des animaux ont confirmé ce lien.



© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013



Si le nerf médian pâtit du supplice de la croix, ce n'est pas le cas du nerf ulnaire, qui reste intact. En détaillant les divers muscles innervés par les nerfs médian et ulnaire, l'équipe de Falls Church a montré comment l'ischémie du premier entraîne la disposition particulière des doigts observée lors d'un crucifiement. Les muscles de la flexion du pouce et de l'index ne sont plus commandés par le nerf médian : les deux doigts restent tendus. Précisons qu'au repos, c'est-à-dire en l'absence d'activation par des neurones, un muscle est détendu, non contracté. Ceux de l'auriculaire et de l'annulaire sont toujours commandés par le nerf ulnaire : les doigts se plient. Enfin, les muscles requis pour la flexion du majeur, dont le muscle fléchisseur profond des doigts, sont innervés par les deux nerfs : on comprend sa position intermédiaire.

Ainsi, le crucifiement se traduit par une neuropathie dont témoigne la position des doigts. Ce symptôme n'est pas décrit dans le film *La vie de Brian*, des Monthy Python (1979), où pourtant un des personnages discute des avantages et des inconvénients des différents supplices des Romains, dont le crucifiement. Et à en croire l'humour grinçant qui caractérise ce film, la torture serait des plus confortables, car… on la subit au grand air. ■

J. Regan *et al.*, **Crucifixion and median neuropathy**, *Brain and Behavior*, publié en ligne le 18 mars 2013.

IDÉES DE PHYSIQUE

Des trains flottant au-dessus des rails

L'avenir du transport ferroviaire passera-t-il par la lévitation magnétique des trains, assurée par des électro-aimants supraconducteurs ?

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

En 2011, à l'occasion du centenaire de la découverte de la supraconductivité (état de résistivité électrique nulle, obtenu à très basse température), des trains miniatures ou un skate supraconducteurs flottant au-dessus de rails magnétiques nous ont émerveillés. Ces prototypes glissant sans frottement annoncent-ils les transports du futur ? Les compagnies *Swissmetro* ou ET3 (*Evacuated Tube Transport Technologies*) nous promettent en effet sécurité, rapidité et frugalité énergétique en faisant circuler dans le vide des véhicules à sustentation magnétique. Ce type de lévitation est d'ailleurs déjà mis en œuvre dans la liaison commerciale *Transrapid* à Shanghaï ou dans les prototypes MLX des *Maglev* japonais, qui détiennent le record du monde de vitesse sur rail (581 kilomètres par heure en 2003).

Lévitation stable ou instable ?

Comment le magnétisme permet-il de faire léviter de façon stable un train entier ? On pourrait croire qu'il est possible de faire léviter un aimant en le rapprochant d'un autre. En effet, avec des aimants au néodyme de quelques centimètres et quelques grammes, on obtient d'intenses forces d'attraction entre pôles opposés ou de répulsion entre pôles identiques, de plusieurs newtons. Mais on découvre vite que l'aimant que l'on cherche à faire léviter se retourne dès qu'on le lâche et se colle à l'aimant qui le repoussait. On démontre que quelle que soit la configuration choisie, une lévitation à base d'aimants permanents (ou d'électro-aimants) est instable.

Pourtant, la lévitation d'un aimant au-dessus d'une plaquette de supraconducteur refroidi est stable *(voir la figure 1)*. Que se passe-t-il ? Un matériau supraconducteur empêche les lignes de champ magnétique de pénétrer en son sein. Lorsqu'on approche un aimant, des courants électriques se forment à la surface du supraconducteur de telle façon que le champ magnétique qu'ils induisent compense le champ extérieur : le champ magnétique total reste nul à l'intérieur du matériau. Ces courants forment ainsi un électro-aimant dont la polarité est en miroir de celle de l'aimant initial. Ce dernier est donc repoussé, quelle que soit son orientation, et la lévitation est stable. Hélas, comme on ne sait pas obtenir de supraconductivité à température ambiante, il est difficile d'imaginer l'installation de rails supraconducteurs sur plusieurs kilomètres.



1. UN AIMANT PLACE AU-DESSUS d'un matériau supraconducteur lévite de façon stable. Il induit dans le supraconducteur des courants qui créent un champ magnétique opposé à celui qu'il exerce, quelle que soit la configuration géométrique (contrairement au cas de deux aimants que l'on rapproche). Ce phénomène correspond au diamagnétisme d'un supraconducteur : soumis à un champ magnétique, un tel matériau empêche les lignes de champ de pénétrer en son sein.

Mais le même type de répulsion, dite diamagnétique, existe aussi avec de la matière à l'état normal, telle l'eau. Le champ magnétique d'un aimant que l'on approche crée en effet, au sein des nuages électroniques des molécules, des courants électriques, lesquels produisent un champ magnétique s'opposant à celui de l'aimant. Lorsque ce dernier est très intense, même l'eau s'aimante assez pour léviter. C'est ainsi qu'en 1997, le physicien russo-néerlandais Andre Geim a fait léviter de l'eau, une petite tomate et même une grenouille vivante *(voir la figure 2)* dans un champ magnétique de 16 teslas.

Cette valeur, 16 teslas, du champ est énorme et bien trop élevée pour des applications à grande échelle. Tout n'est cependant pas perdu. Un métal normal, tel le cuivre, peut aussi repousser un aimant. Il suffit pour cela que le métal et l'aimant soient en mouvement l'un par rapport à l'autre. Lorsqu'un aimant est déplacé parallèlement à la surface d'un conducteur, la variation avec le temps du champ magnétique en chaque point du conducteur induit des courants électriques, les courants dits de Foucault. Ces derniers engendrent un champ magnétique qui agit en retour sur l'aimant.

L'action des courants de Foucault s'oppose à la cause qui les a produits (loi de Lenz). Le premier effet est donc une force de traînée, opposée à la vitesse ; on le met à profit dans les freins à induction qui équipent les camions ou les trains à grande vitesse. Un second effet, moins connu, est l'apparition d'une force de portance qui repousse l'aimant : puisque le champ magnétique de l'aimant diminue avec la distance, et les courants induits aussi, la loi de Lenz favorise l'éloignement. De façon remarquable, la portance croît avec la vitesse de l'aimant pour atteindre une certaine valeur maximale, tandis que la traînée passe par un maximum, puis diminue à vitesse plus élevée.

Le train flotte grâce aux courants induits

En 1966, les chercheurs américains James Powell et Gordon Danby ont proposé d'utiliser ce mécanisme pour sustenter un train, et ont contribué à développer sur ce principe le *Maglev* japonais. Dans ce système, la force de portance, qui augmente avec la vitesse, n'est suffisamment élevée que si la vitesse du train dépasse un certain seuil, de l'ordre de 100 kilomètres par heure pour les MLX. Le train est donc muni de roues ne servant qu'aux phases de démarrage ou d'arrêt. En phase de lévitation, la stabilité du train est automatiquement assurée : si le véhicule se rapproche du sol, la force de portance, répulsive, augmente et empêche le contact.

La force de traînée pose en revanche un sérieux problème. Elle serait rédhibitoire si J. Powell et G. Danby n'avaient eu l'idée d'utiliser pour les rails, non pas un conducteur massif placé sous le train, mais des bobines conductrices en forme de huit connectées les unes aux autres et placées de chaque côté *(voir la figure 3)*. Les deux boucles qui composent le huit ont des enroulements de sens opposés. Il s'ensuit que lorsque l'aimant qui lui fait face est centré, les flux magnétiques qui traversent ces deux boucles se compensent. Il n'y a alors pas de courant induit, donc pas de dissipation d'énergie.

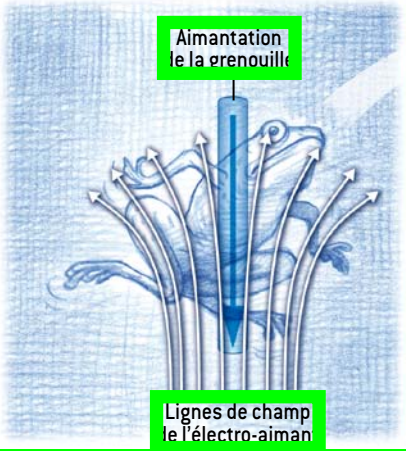
Dans cette situation, il n'y a pas non plus de portance. Par conséquent, sous l'effet de son poids, le train s'abaisse légèrement sous le plan de symétrie. Des courants sont alors induits dans le circuit et engendrent une portance proportionnelle à l'abaissement, tandis que la traînée croît comme son carré. Pour les faibles écartements, cette traînée magnétique, 100 fois inférieure à la portance, est un ordre de grandeur inférieur à la traînée aérodynamique.

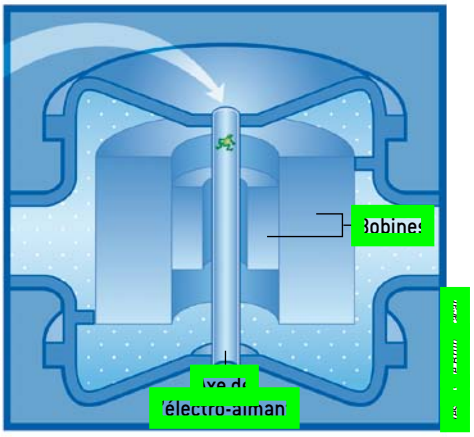
Le MLX fonctionne avec de tels rails. A grande vitesse, il flotte à quelques centimètres au-dessus du sol, un écart confortable pour pallier d'éventuels incidents. Par ailleurs, s'il se rapproche d'un des rails et

LES AUTEURS

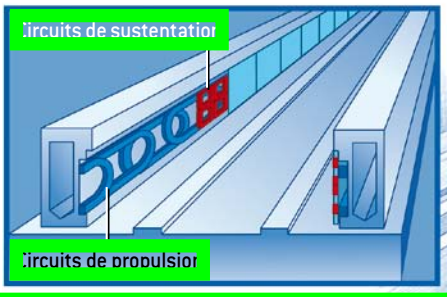


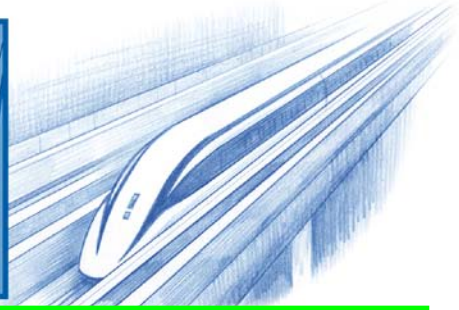

Jean-Michel COURTY
et Édouard KIERLIK
sont professeurs de physique
à l'Université Pierre
et Marie Curie, à Paris.
Leur blog : http://blog.idphus.f





2. UN CHAMP MAGNETIQUE PUISSANT ET NON HOMOGENE, produit par un électro-aimant, peut faire léviter de façon stable un objet ordinaire. En agissant sur les nuages électroniques des molécules, le champ magnétique induit en chacun des points de l'objet de minuscules boucles de courant électrique. Ces courants, *via* les champs magnétiques qu'ils engendrent, s'opposent aux causes qui les produisent : l'objet est repoussé vers des zones où règne un champ magnétique plus faible.





3. LE TRAIN EXPERIMENTAL JAPONAIS *MAGLEV* a un système de sustentation magnétique composé de circuits en huit *(en rouge)* disposés latéralement sur les rails et fonctionnant grâce à des électro-aimants supraconducteurs embarqués. Si le train dévie verticalement ou latéralement par rapport aux rails, le champ magnétique des électro-aimants induit dans les circuits en huit des courants, lesquels engendrent des champs magnétiques qui rectifient la posture du train. La propulsion est également assurée par des champs magnétiques, *via* un jeu de bobines embarquées et un autre jeu de bobines *(en bleu)* disposées le long des rails.

BIBLIOGRAPHIE

D. Oster *et al.*, **Evacuated tube transport technologies (ET3) : A maximum value global transportation network [...]**, *Journal of Modern Transportation*, vol. 19(1), pp. 42-50, 2011.

J. Powell et G. Danby, **Maglev : The new mode of transport for the 21st century**, *21st Century Science and Technology*, vol. 16(2), pp. 43-52, 2003.

B. V. Jayawant, **Electromagnetic suspension and levitation techniques**, *Proceedings of the Royal Society of London A*, vol. 416, pp. 245-320, 1988.

Retrouvez les articles de J.-M. Courty et É. Kierlik sur

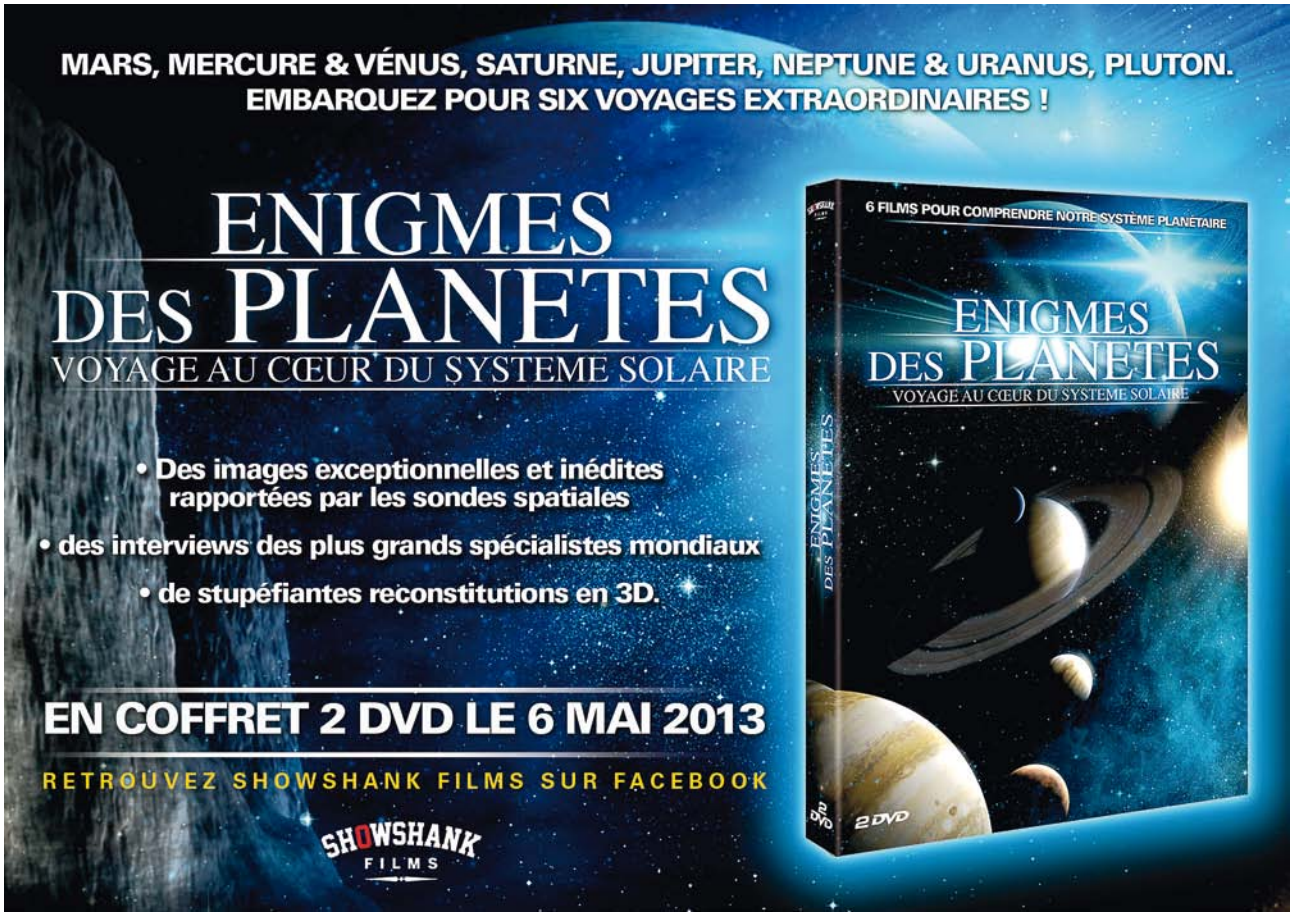
www.pourlascience.fr

s'éloigne donc de l'autre, par exemple sous l'effet du vent, une force latérale apparaît et vient le ramener dans le droit chemin.

L'autre idée astucieuse de J. Powell et G. Dandy est d'avoir suggéré l'utilisation d'électro-aimants supraconducteurs embarqués dans le train. Extrêmement puissants, capables de créer les forces de sustentation suffisantes, ces aimants ont une résistance électrique – donc une consommation électrique – nulle, même lorsqu'ils sont parcourus par des centaines de kiloampères. En revanche, il faut alimenter le système cryogénique qui refroidit et maintient l'alliage niobium-titane à la température de l'hélium liquide (4,2 kelvins, soit – 269 °C). On comprend l'intérêt que pourrait représenter pour ces trains le développement de matériaux restant supraconducteurs jusqu'à une température relativement élevée (supérieure à 77 kelvins, la température de l'azote liquide) !

Par ailleurs, c'est aussi le magnétisme qui assure la propulsion, grâce à un moteur mettant en jeu des bobines embarquées alimentées en courant alternatif et un second jeu de bobines situées le long du rail.

On le devine, la conception des rails reste compliquée et le coût d'infrastructure élevé. Cela n'empêche pas certains de rêver déjà à la génération suivante : puisque le ralentissement principal est dû à la traînée aérodynamique, supprimons-la en faisant circuler ces trains dans des tubes où règne le vide ! C'est ainsi que les projets *Swissmetro* ou plus récemment encore ET3 promettent de gagner un ordre de grandeur en vitesse pour une même dépense énergétique. À quand des trains glissant à 5 000 kilomètres par heure ?



© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013



Innovatives SHS

Salon de la valorisation en sciences humaines et sociales

16 et 17 mai 2013
Espace Charenton
Paris 12e

cnrs
www.cnrs.fr

ATHENA
alliance nationale des sciences humaines et sociales

L'intelli'agence
www.intelliagence.fr

RESEAU C.U.R.I.E.

MAIRIE DE PARIS

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE

MCE ma chaîne étudiante

casden BANQUE POPULAIRE

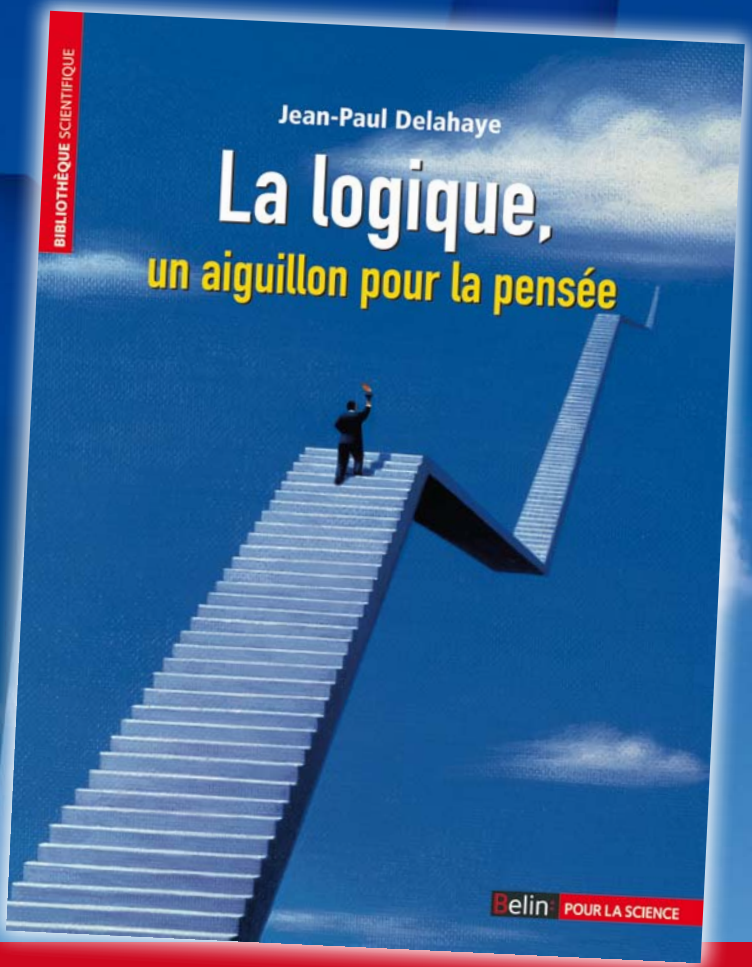
îledeFrance

POUR LA SCIENCE

La logique,

un aiguillon pour la pensée

Jean-Paul Delahaye



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

Éditions Belin/Pour la Science 2012
200 pages – 27 euros – ISBN 978-2-8424-5115-8

BON DE COMMANDE

POUR LA SCIENCE

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

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

..... exemplaires × 27,00 € (Réf. 075115) = ... €
Frais de port (4,90 € France – 12 € étranger) + ... €
TOTAL À REGLER = ... €

J'indique mes coordonnées :

Nom : _____
Prénom : _____
Adresse : _____
_____
C.P. : _____ Ville : _____
Pays : _____ Tél. : _____ (facultatif)

E-mail pour recevoir la newsleter *Pour la Science* (à remplir en majuscules).
_____@_____

Je choisis mon mode de règlement
❑ par chèque à l'ordre de *Pour la Science*
❑ par carte bancaire
Numéro _____
Date d'expiration _____
Cryptogramme _____
Signature obligatoire

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

LOGIP427
Offre valable jusqu'au 31.05.13, dans la limite des stocks disponibles.

SCIENCE & GASTRONOMIE

Persillé, votre pseudosteak ?

Des consistances nouvelles, se rapprochant de celle de la viande, peuvent être obtenues à partir d'ingrédients modernes.

Hervé THIS



Alors qu'une partie du public s'effraie des fraudes impardonnables (même si elles ne mettent pas notre santé en péril) qui secouent le monde de la viande, n'est-il pas temps de chercher des moyens d'éviter leur répétition ? Cette prévention passe sans doute par des contrôles plus stricts, mais l'histoire de l'humanité montre que l'on n'a jamais réussi à se débarrasser de tous les malhonnêtes. Peut-être est-il plus judicieux de chercher... à manger autre chose que la viande ?

Rassurez-vous, mon propos n'est pas de vous pousser au végétarianisme, mais d'explorer de nouveaux territoires, où le goût serait augmenté, pas affaibli.

Même quand la viande n'est pas falsifiée, sa consistance n'est pas maîtrisée par la cuisinière ou le cuisinier. On achète la viande telle qu'elle est et, au mieux, on peut choisir son fournisseur. Lors de la cuisson, on durcit ou on attendrit la matière acquise, mais avec une gamme de variations assez faible, car nous ne disposons que de deux paramètres : le temps et la température.

Certes l'usage d'enzymes protéolytiques (qui coupent les protéines, notamment celles de la viande) a des effets bien réels : injectons du jus de papaye, d'ananas, de figue, de cassis dans une viande), mais les modifications sont encore plus difficiles à maîtriser : en plus d'être bien lentes, les enzymes ne parviennent qu'à modifier le tissu collagénique qui gaine les fibres musculaires, mais ne s'introduisent pas dans les fibres elles-mêmes.

La culture *in vitro* de cellules de tissu musculaire ? C'est une piste qui est explorée aux Pays-Bas, mais de telles cultures sont lentes.

Alors ? Alors il est utile de se souvenir que la viande est faite de fibres musculaires, assemblées par du tissu collagénique. Autrement dit, ce sont des tubes collés par le collagène, les tubes contenant des protéines et de l'eau, soit une matière analogue à celle du blanc d'œuf, lequel est composé de 90 pour cent d'eau et de 10 pour cent de protéines.

De ce fait, ne pourrions-nous pas commencer simplement par chercher une approximation de viande en mêlant des protéines et de l'eau ? La solution la plus simple est le blanc d'œuf que l'on cuit... mais, même caoutchouteux après plus de dix minutes de cuisson à 100 °C, on ne le mâche pas aussi agréablement qu'une viande.

Faire plus consistant ? Il suffit d'augmenter la proportion de protéines, de diminuer la teneur en eau. Comment ? Soit on fait sécher le blanc (ne craignons pas qu'il « pourrisse », car Alexander Fleming, connu pour la pénicilline, a découvert que le blanc contient une enzyme, le lysozyme, qui est un bon antibactérien), soit on utilise de la poudre de blanc d'œuf. Par exemple, prenons 50 grammes de cette poudre, composée surtout de protéines, et ajoutons 40 grammes d'eau : nous obtenons une pâte blanche, qui, mise en forme de galette et cuite à la poêle, ressemble beaucoup à un steak, à la couleur et aux fibres près. La couleur ? Nous la modifions à l'aide de colorants bien choisis. Les fibres ? Une merveilleuse solution consiste à étaler la matière en mince couche, à la scarifier à l'aide d'un peigne (propre) avant de cuire, puis à badigeonner la couche mince cuite à l'aide de la pâte non cuite, avant de replier l'ensemble sur lui-même et de cuire à nouveau.

Le résultat est plus intéressant, mais il manque de goût. Qu'à cela ne tienne : ajoutons du sel, du glucose (on en trouvera chez les pâtissiers), des acides aminés (dans les boutiques de diététique) et des solutions obtenues par dilution d'huiles essentielles. Il manque encore de tenue ? N'hésitons pas à centrifuger des carottes, à récupérer la pulpe, laquelle est de la cellulose quasi pure, que l'on jette souvent : après séchage, cette matière donnera plus de consistance à notre produit.

Finalement voulez-vous un résultat « persillé » ? Il suffira d'ajouter un peu d'huile, au produit cru, avant cuisson.

Ce que nous obtiendrons ne sera pas du bœuf... mais ce ne sera pas non plus du cheval ! Et si le travail est bien fait, ce sera bon. N'est-ce pas, *in fine*, notre quête ? ■



Hervé THIS est chimiste dans le Groupe INRA de gastronomie moléculaire, professeur à AgroParisTech et directeur scientifique de la Fondation Science & Culture Alimentaire (Académie des sciences).

Retrouvez les articles de H. This sur www.pourlascience.fr

PHYSIQUE

L'élégante efficacité des symétries

Amaury Mouchet
Dunod, 2013
(225 pages, 19 euros)

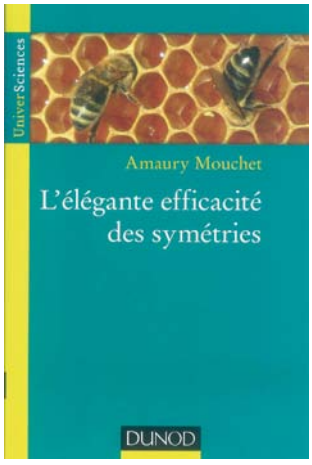
Richard Taillet
Université de Savoie

Dans cet ouvrage, Amaury Mouchet, physicien à l'Université François Rabelais de Tours, présente un tour d'horizon des différentes notions que recouvre le mot « symétrie ». Partant de l'idée naturelle et intuitive que l'on s'en fait, il nous entraîne, pas à pas, vers des considérations épistémologiques beaucoup plus générales.

Le mot évoque en premier lieu des figures ou des images possédant un trait marquant : elles restent inchangées lorsqu'on leur fait subir une transformation (une rotation d'un cinquième de tour pour une étoile de mer, par exemple), qui porte elle-même le nom de symétrie. L'esprit humain a une grande aptitude à reconnaître ces situations, même lorsque la symétrie est imparfaite : on s'aperçoit immédiatement qu'il manque une dent à un peigne ou un bras à une étoile de mer.

Les symétries jouent un rôle primordial en physique. On les rencontre d'abord pour simplifier la description des systèmes et la résolution des problèmes : si l'on identifie une symétrie dans des équations ou dans une situation expérimentale, on peut s'attendre à trouver une trace de cette symétrie dans les solutions ou les grandeurs physiques qui décrivent le système, ce qui peut simplifier considérablement leur recherche.

Les symétries ont encore gagné en importance lorsque, au début du XXe siècle, la mathématicienne allemande Emmy Noether a montré qu'à certaines symétries des lois de la nature sont associées des grandeurs conservées ; par exemple, le fait que les lois de la physique soient les mêmes aujourd'hui et demain impose qu'une quantité bien spécifique soit conservée – l'énergie. Certaines de ces symétries peuvent être « cachées » : si l'on fait tomber une boîte d'épingles au sol, l'ensemble des directions de toutes les épingles fait apparaître une symétrie de rotation, même si chaque épingle pointe dans une direction précise qui ne respecte pas cette symétrie. Ces



notions sont au cœur de l'ouvrage d'A. Mouchet et l'on en trouvera des illustrations variées, de l'art aux mathématiques, en passant par la botanique et la physique (l'existence du boson de Higgs, au cœur de l'actualité ces temps-ci, est intimement liée à des symétries cachées en physique des particules).

Au cœur de ce livre s'en cache un autre, qui nous parle d'épistémologie. Car la notion de symétrie est plus générale encore : l'intelligence humaine et la formulation de lois scientifiques reposent en partie sur cette capacité à regrouper les objets, les concepts, selon certaines caractéristiques communes qui peuvent être décrites par des symétries. On peut même proposer, comme le fait l'auteur, que la compréhension d'un phénomène ou d'un concept passe par la reconnaissance d'une symétrie, qu'elle soit explicite ou cachée.

L'ouvrage fournit un guide précis à travers ces différentes facettes de la notion de symétrie, en laissant s'exprimer d'autres voix : les nombreuses citations de physiciens, mathématiciens, philosophes, écrivains en tête de chaque chapitre pourraient former à elles seules un troisième livre…

HISTOIRE DES SCIENCES

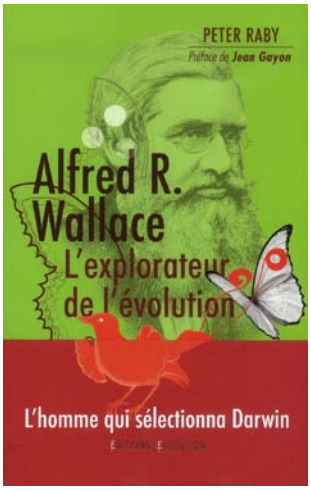
Alfred R. Wallace

Peter Raby
Éditions de l'Évolution, 2013
(445 pages, 24 euros)

À qui doit-on le concept d'évolution par sélection naturelle ? À Charles Darwin, bien sûr, mais aussi à Alfred Russel Wallace (1823-1913). On sait la consternation de Darwin quand, au printemps 1858, il reçut de Wallace, qui séjournait alors sur une île lointaine de l'archipel de la Sonde, un texte dans lequel ce dernier exposait une hypothèse identique à la sienne. On sait aussi comment cela donna lieu à une présentation publique et une publication simultanées des idées des deux hommes, sauvegardant la priorité de chacun. Au vu de leurs notoriétés ultérieures, on pourrait ne voir en Wallace que l'ombre de Darwin. L'excellente biographie de Peter Raby nous montre que rien n'est plus loin de la réalité.

Les deux hommes étaient dissemblables à beaucoup d'égards. Contrairement à Darwin, Wallace ne disposait pas d'une fortune familiale. Dépourvu d'une éducation universitaire, et après avoir exercé ce que l'on nommerait aujourd'hui divers petits boulots, il passa de nombreuses années en Amazonie, puis dans les îles de la Sonde, à récolter des spécimens animaux et végétaux pour les vendre à des musées ou de riches amateurs – tout en accumulant les observations scientifiques. De retour en Angleterre en 1862 (avec deux oiseaux de paradis vivants !), il y fut accueilli comme un éminent voyageur et naturaliste. Mais il ne trouva pas pour autant un poste dans une institution scientifique officielle, et connut pendant une bonne partie de sa longue vie des difficultés financières.

Il faut dire que certaines de ses prises de position ne l'aidèrent pas à s'intégrer à l'*establishment* scientifique victorien : outre ses idées socialistes un peu naïves et son combat en faveur de la nationalisation des terres, Wallace s'opposait par exemple fermement à la vaccination. Son adhésion passionnée au spiritisme ne lui fit pas non plus que des amis, même s'il n'était pas le seul scientifique éminent, à cette époque, à s'intéresser aux tables tournantes et aux esprits frappeurs. Ses convictions philosophiques devaient d'ailleurs faire de lui un « hérétique » de la biologie darwinienne, dans la mesure où il pensait que l'évolution de l'espèce humaine était guidée par des forces spirituelles bien plus que par la sélection naturelle. Pour autant,



© Pour la Science - n° 427 - Mai 2013

son prestige scientifique demeura grand jusqu'à sa mort.

Peter Raby nous raconte la vie singulière de ce grand chercheur avec sympathie et lucidité et on peut être reconnaissant aux Éditions de l'Évolution d'avoir rendu ce livre accessible aux lecteurs francophones.

Eric Buffetaut
CNRS, Laboratoire de géologie de l'École normale supérieure

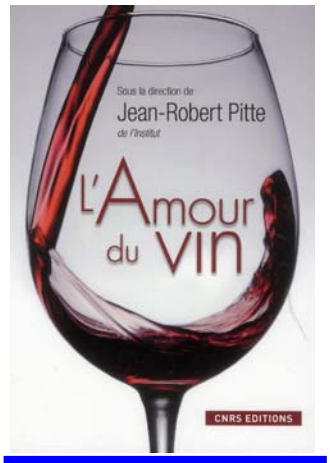
SOCIOLOGIE

L'amour du vin

Jean-Robert Pitte (sous la dir.)
CNRS Éditions, 2013
(122 pages, 12 euros)

Vin et condition humaine, vin et amour, qu'est-ce que je bois en buvant du vin, patrimoine culturel de l'humanité, prohibition aux États-Unis, vin et cancer, initier les jeunes au vin, l'amour du vin, vers un droit raisonnable, vin et judaïsme, vin et infini, vin et Islam, la nuit du 4 août: voici les quelques chapitres de ce petit livre, étonnamment publié par les Éditions du CNRS. Oui, étonnamment, car quel rapport entre le vin et le CNRS, dont la mission est de produire de la connaissance «scientifique»?

Il faut sans doute entendre par «scientifique» quelque chose de large, qui comprenne à la fois les sciences de la nature et les sciences humaines et sociales. D'où le choix des thèmes, qui ne font pas de place à la physique, à la chimie, à la biologie, à l'astronomie, à la géologie. Non, il s'agit plutôt de lutter contre un certain hygiénisme, qui voudrait faire croire à une nation qui fait du vin depuis des millénaires (au moins deux) qu'il faudrait s'arrêter. Notre bon Rabelais nommait ceux-là des «pisse vinaigre», et il est exact qu'il faut lutter.



Les amateurs de vin, eux, les «gourmets» (on rappelle ici que le mot désigne une profession chargée de choisir des vins pour les négociants, d'où, par extension, la désignation de ceux qui aiment le vin), sont moins censeurs, plus aimables, et ils considèrent qu'il faut se méfier de ceux qui ne boivent que de l'eau. Du moins est-ce l'un des messages portés par ce livre écrit à plusieurs mains pour célébrer le vin.

Un livre à lire… un bon verre à la main, et entre amis, puisque le vin, c'est aussi la convivialité, qui évite que l'on ne sombre dans un alcoolisme dont le gastronome Jean-Anthelme Brillat-Savarin parlait en ces mots en 1825: «Celui qui s'indigère ou qui s'enivre ne sait ni manger ni boire.»

Hervé This

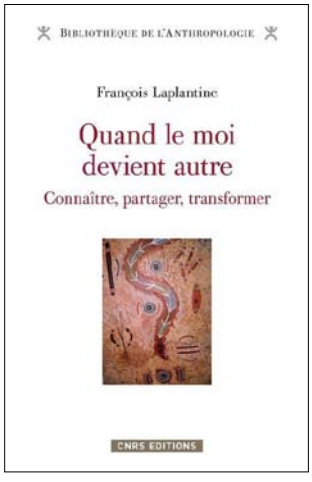
ANTHROPOLOGIE

Quand le moi devient autre

François Laplantine
CNRS Éditions, 2012
(200 pages, 25 euros)

«Les langues génèrent la pensée», écrit l'anthropologue François Laplantine. «D'une langue à l'autre, il n'y a pas d'équivalents. Tout ce qui peut être dit peut être dit différemment. Mais dire différemment la même chose, c'est dire autre chose.» Lorsque Fr. Laplantine explique – en français – des notions spécifiques au Japon, à la Chine ou au Brésil, son entreprise est d'autant plus passionnante qu'elle ne peut pas, et ne doit pas, réussir totalement. L'attrait de l'anthropologie ne réside-t-il pas dans le fait que comprendre un peuple étranger est un travail sans fin et que, toujours, quelque chose, sinon même l'essentiel, échappe? Que ce livre ne réponde pas à toutes les questions qui viennent à l'esprit est donc à porter à son crédit.

Refusant de tenir pour «transcendantal et universel» ce qui est «grammatical et culturel», l'auteur dénonce «le privilège exorbitant dont s'autocrédite le sujet que Kant a appelé "transcendantal" qui est en fait occidental». Plutôt que recourir au «je» comme à une instance unificatrice, Fr. Laplantine tente de se décentrer. Cela lui impose de prendre du recul sur sa propre langue. Un Français est incité à se mettre naturellement au centre, parce que sa langue ne peut guère construire de phrase sans sujet. Il dira: je sais, je pense, je vais vous dire, etc. La langue japonaise ne



Brèves

L'homme et la nature
Une histoire mouvementée



Valérie Chansigaud
Delachaux & Niestlé, 2013
(272 pages, 34,90 euros).

L'impact de l'homme sur l'environnement n'a pas commencé avec l'industrialisation, ni même avec l'agriculture. De la disparition des grands mammifères de la Préhistoire jusqu'à la surexploitation des sols et des mers actuelle, l'auteure, historienne de l'environnement, montre, par ce beau livre illustré et très documenté, comment l'homme a peu à peu conquis la Terre au détriment des autres espèces vivantes. De nombreuses cartes et chronologies permettent de mesurer les enjeux qui nous attendent.

L'Empire des sciences… naturelles



Francis Gires (sous la dir.)
ASEISTE, 2013
(405 pages, 40 euros).

Les armoires des lycées impériaux recèlent de nombreux trésors historiques et pédagogiques, que l'association ASEISTE a entrepris de sauvegarder depuis une quinzaine d'années. Après la physique, c'est à présent aux sciences naturelles qu'elle consacre un bel ouvrage. Rassemblant animaux empaillés, écorchés en papier mâché, herbiers, squelettes, insectes et bocaux issus des cabinets d'histoire naturelle de deux lycées, l'un à Périgueux, l'autre à Angoulême, cet inventaire illustré est accompagné de plusieurs mises en perspective historiques de ces collections. Un outil pédagogique passionnant.

Les grandes expériences scientifiques à Paris



Frédéric Borel
Parigramme, 2013
(240 pages, 19,90 euros).

La première draisienne, les premiers vols de montgolfières, les débuts de l'eau de Javel, la pile de Volta, le cyclotron du Collège de France, le pendule de Foucault, le méridien de Paris, les roues dentées de Fizeau, le télégraphe de Chappe… Toutes ces inventions, et beaucoup d'autres, ont un point commun: elles ont été réalisées à Paris ou dans ses environs. Pour chacune, l'auteur retrace l'histoire de la découverte et en donne une explication scientifique. Un petit guide illustré pour tous ceux qui veulent découvrir Paris sous un regard neuf.

Brèves

Douleurs animales en élevage



Ph. Chemineau (sous la dir.)
Quæ, 2013
(130 pages, 25 euros).

Les animaux ne devraient plus souffrir, murmure de plus en plus fort la *vox populi* occidentale. Est-ce praticable ? Pas sûr. Pas vite en tout cas. Alors il faut regarder en face comment nous faisons souffrir les espèces que nous exploitons pour vivre, les pratiques installées, les différences entre stress et souffrance, les coûts induits par la réduction de la souffrance dans les industries, etc. Très bien réalisé, ce rapport d'experts commandé à l'INRA livre l'essentiel de cet aspect éthiquement difficile de notre mode de vie.

Mange tes méduses !



Ph. Cury et D. Pauly
Odile Jacob, 2013
(216 pages, 21,90 euros).

Les auteurs sont des spécialistes de la pêche, la dernière activité de prédation à grande échelle de l'humanité. Bien placés par leur métier pour observer la surexploitation des mers, ils sonnent l'alerte et n'annoncent rien moins que la destruction de la nature. Les lire est donc éprouvant comme la dégustation d'une méduse, mais intéressant et instructif ; les suivre quand ils décrivent les avancées vers une économie durable de la pêche est réconfortant. Mangez de cette méduse, puis réconfortez-vous.

L'inexistence du temps



Patrice Dassonville
Persée, 2013
(220 pages, 16,90 euros).

L'auteur, qui se présente comme un chercheur indépendant, nous livre un petit opus très documenté qui ne sera pas une perte de temps. Instinctive, ressentie par tous, la notion de temps est difficile à définir. Elle connaît diverses acceptions scientifiques ou culturelles et a été perçue dans le passé de nombreuses façons différentes ; elle ne serait pas, selon l'auteur, un aspect de la nature, mais davantage un paramètre utile pour décrire son évolution, qui pourrait (devrait ?) être remplacé. Que l'auteur ait raison ou pas, il devient clair, à lire son livre, qu'il faut se méfier de cette notion si fuyante qu'est le temps.

connaît pas le sujet ; plus sensibles aux fluctuations qu'aux oppositions binaires, les Japonais ont un rapport au monde différent.

Autre décentrement pratiqué par Fr. Laplantine : le « triangle de la connaissance anthropologique ». S'il n'étudiait qu'une société étrangère, la confrontation dualiste de celle-ci avec la société occidentale, dont il est issu, risquerait de le mener à prendre une des deux sociétés comme la référence, c'est-à-dire la mesure, de l'autre. Le triangle obtenu en s'intéressant à deux zones géographiques (en l'occurrence, Brésil et Chine-Japon) empêche de s'enfermer dans un tel face-à-face. Ainsi privée de centre, la perspective est plus riche.

La distance prise par Fr. Laplantine sur l'Occident ne signifie pas un enthousiasme aveugle pour ce qui se passe ailleurs. Le livre s'achève sur une saga au goût amer. Appauvris par la guerre contre la Russie, des Japonais ont émigré au Brésil à partir de 1908. Dans les années 1980, leurs descendants, mal intégrés au Brésil, ont tenté de se réinstaller au Japon, mais n'y ont pas été bien reçus. Génération après génération se dessine un triste ballet d'allers décevants et de retours manqués.

→ Didier Nordon

ANTHROPOLOGIE SOCIALE

L'événement et la maladie

Serena Bindi *et al.*
Mondes contemporains, revue d'anthropologie sociale et culturelle, n°2, 2012
(185 pages, 14 euros).

Ce numéro de la revue *Mondes contemporains* met en évidence l'intérêt et l'actualité de l'anthropologie de la maladie. À travers plusieurs exemples puisés dans diverses régions du monde, le lecteur est amené à réfléchir sur le fait que, loin d'être purement biologique, la maladie constitue un événement tout autant social et culturel. En effet, l'individu malade ressent et cause inquiétudes et perte de sens, ce qui bouscule l'ordre symbolique, et incite le groupe à formuler une explication et des pratiques rituelles pour le restaurer.

Le cas d'un petit village de paysans d'Inde himalayenne, analysé par S. Bindi, est à ce titre instructif : une femme se trouve affectée d'une jambe gonflée, ce qui l'empêche de travailler, alors que les médicaments prescrits par le médecin n'y font rien. Les villageois adoptent l'explication selon laquelle elle est possédée partiellement par le fantôme d'un homme mort au cours d'un tremblement de terre ancien – la raison à cela est attribuée à un comportement inconvenant, car elle quitte trop souvent le périmètre protégé du village pour aller visiter ses cousins. On voit comment, pour expliquer le mal, la société locale fait appel à la mémoire du groupe et à la condition dominée de la femme mariée.

Toutefois, le sens attribué à la maladie n'est pas donné d'office. S. Fainzang, enquêtant chez les Bisa du Burkina-Faso, montre certes elle aussi que la maladie est presque toujours expliquée par une inconduite de l'individu ou par la transgression d'un interdit – une façon pour les élites locales d'imposer le respect des normes (règles matrimoniales, organisation lignagère), voire de contrôler les individus. Ainsi, un homme affecté de squames sur le visage est dit avoir attrapé la « maladie du python » parce qu'il a regardé un serpent habité par un génie : on pense alors que le monde magique le punit pour une faute commise. Toutefois, l'individu peut refuser ce jugement social en affirmant qu'il n'a pas croisé de serpent. Auquel cas, il transgresse la norme collective et élabore sa propre théorie, un peu comme une personne qui en France attribuerait ses maux de tête à la proximité de lignes à haute tension, et ce contre l'avis du médecin.

Le cas de la maladie grave en Occident, étudié par E. Fournet, illustre bien enfin comment, dans un monde contemporain où les explications traditionnelles sont largement exclues, le malade cherche à donner du sens en instaurant un dialogue avec autrui – même quand ce dialogue trouve son aboutissement dans la demande personnelle d'euthanasie.



→ Régis Meyran
Docteur de l'École des hautes études en sciences sociales

Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur www.pourlascience.fr

Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal 5636 – Mai 2013 – N° d'édition 022422-01 – Commission paritaire n° 0912K82029 – Distribution : NMPP – ISSN 0153-4092 – N° d'imprimeur 1017181-232 – Directrice de la publication et gérante : Sylvie Marcé

QSR International | NVIVO

RITME présente

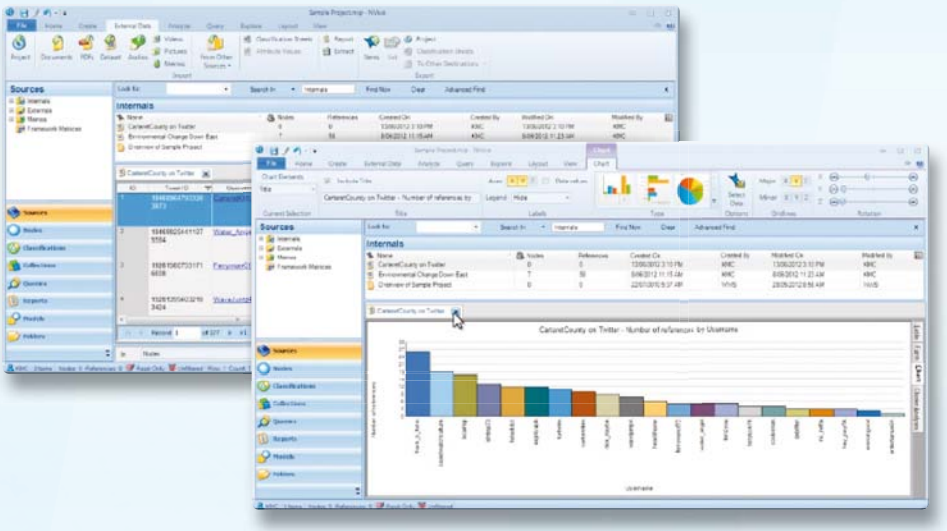
NOTRE MÉTIER : FACILITER LE VÔTRE

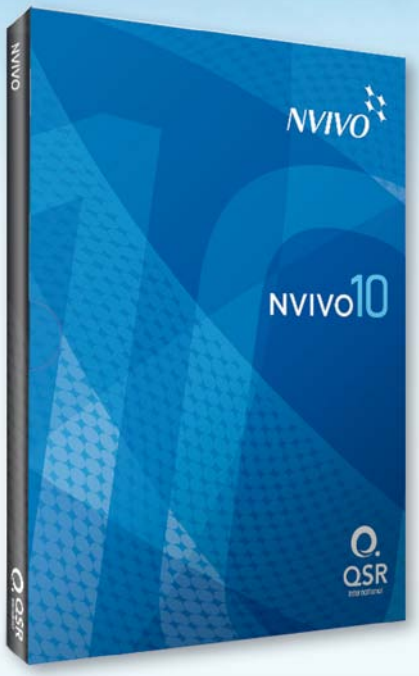
NVIVO 10

Avez-vous besoin d'analyser les informations contenues dans des documents, des sondages, des fichiers audio, des vidéos, des photos, des réseaux sociaux et des pages internet ?

NVivo est un logiciel d'analyse qualitative qui vous aide à organiser et à analyser facilement vos données.

Quel que soit votre matériel, quel que soit votre projet, NVivo vous aide à trouver rapidement des solutions, à justifier vos conclusions et à prendre des décisions basées sur une connaissance des faits.





Disponible pour Windows (32/64 bits)

www.ritme.com/fr/product/nvivo

RITME - Distributeur Officiel • 34, bd Haussmann • 75009 Paris • France
Tél. : +33 (0)1 42 46 00 42 • Fax : +33 (0)1 42 46 00 33
info@ritme.com • www.ritme.com

Sauf indication contraire : logiciel et documentation en anglais, et livraison par téléchargement ou par CD-Rom
© Copyright 2012 RITME. NVivo est une marque déposée de QSR International.
Toutes les marques déposées sont la propriété de leurs sociétés respectives.

RITME
NOTRE MÉTIER : FACILITER LE VÔTRE
Distributeur officiel en France

Et si vous choisissiez la stabilité du long terme plutôt que la fragilité du court terme ?



Quand une banque partage les valeurs de ses Sociétaires, leur confiance est réciproque et durable. Depuis 60 ans, la CASDEN s'engage, au quotidien, à leurs côtés afin qu'ils réalisent leurs projets en toute sécurité et aux meilleures conditions. Être une banque coopérative, c'est protéger avant tout les intérêts de ses Sociétaires.

Rejoignez-nous sur casden.fr ou contactez-nous au 0826 824 400

BANQUE POPULAIRE

L'offre CASDEN est disponible en Délégations Départementales et également dans le Réseau Banque Populaire

casden
BANQUE POPULAIRE

CASDEN, la banque coopérative de l'éducation, de la recherche et de la culture

Avis de Tempête