PHYSIQUE THÉORIQUE : particules et champs, des concepts sans réalité ?

POUR LA SCIENCE

Octobre 2013 - n° 432

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

Quand le sommeil élimine les souvenirs inutiles

La naissance de l'écriture en Égypte

Le phytoplancton, un moteur de l'évolution

Des nanomédicaments pour le cerveau

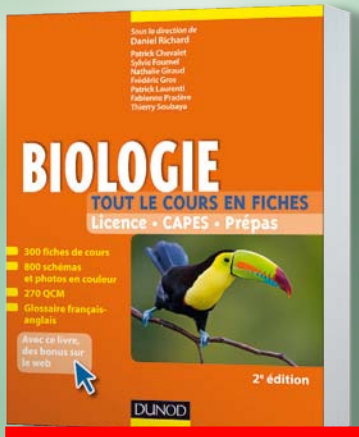
M 02687 - 432 - F: 6,20 € - RD

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

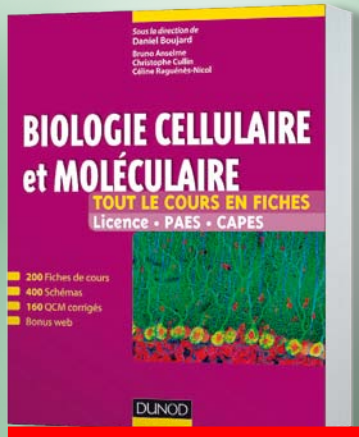
La rentrée des sciences chez DUNOD

Collection Tout le cours en fiches

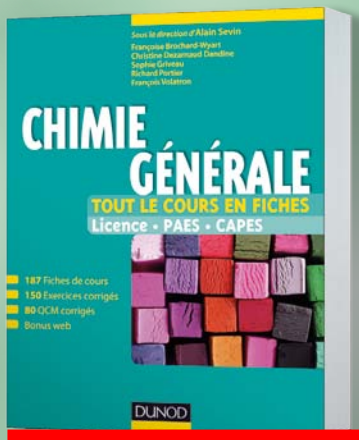
Des fiches de cours synthétiques pour retenir l'essentiel
Des exercices et des sujets de synthèse pour s'entraîner
Des QCM pour s'évaluer
Des focus pour compléter ses connaissances
Des ressources numériques complémentaires



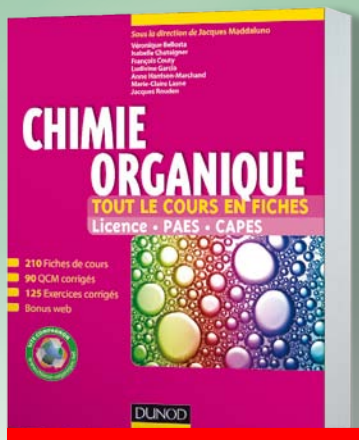
Sous la dir. de **D. Richard**, ***et al.***
9782100582235 • **45 €**



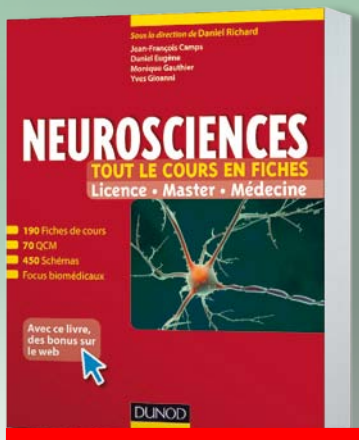
Sous la dir. de **D. Boujard**, ***et al.***
9782100564255 • **35 €**



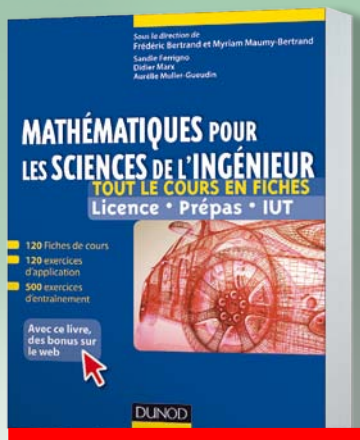
Sous la dir. de **A. Sevin**, ***et al.***
9782100570201 • **35 €**



Sous la dir. de **J. Maddaluno**, ***et al.***
9782100581641 • **35 €**



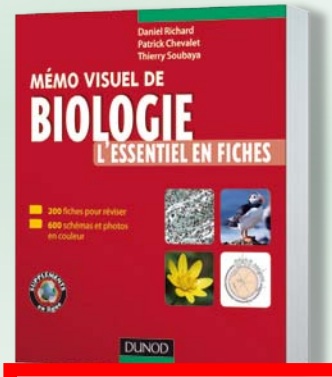
Sous la dir. de **D. Richard**, ***et al.***
9782100585045 • **49 €**



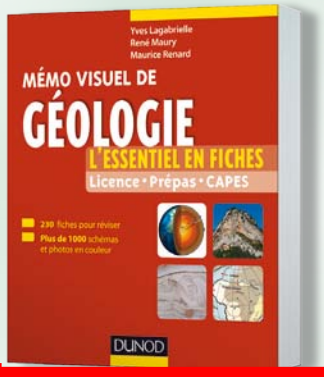
Sous la dir. de **F. Bertrand, M. Maumy Bertrand**, ***et al.***
9782100570614 • **29 €**

Collection Mémo visuels

Pour réviser d'un seul coup d'œil



D. Richard, P. Chevalet, T. Soubaya
9782100564118 • **22,90 €**



Y. Lagabrielle, R. Maury, M. Renard
9782100584994 • **22,90 €**

www.dunod.com

DUNOD
ÉDITEUR DE SAVOIRS

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 Pour la Science
Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin
Cerveau & Psycho
Rédactrice en chef : Françoise Pétry
Rédacteur : Sébastien Bohler
L'Essentiel Cerveau & Psycho
Rédactrice : Bénédicte Salthun-Lassalle
Directrice artistique : Céline Lapert
Secrétariat de rédaction/Maquette : Sylvie Sobelman, Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy, Caroline Vanhoove
Site Internet : Philippe Ribeau-Gésippe
Marketing : Élise Abib et Ophélie Maillet assistées de 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 :
François Beauducel, Philippe Bouyer, Ismaël Cognard, Michael Esfeld, Jessica Flahaut, Fabien Gillet-Chaulet, Florence Greffe, Gitan Haddok, Evelyne Host-Platret, Andrey Kajava, Christophe Pichon, Subhojit Roy, Jeroen Sonke, Daniel Tacquenet, Pascale Thiollier-Dumartin, Pierre Vanderbaeghen

PUBLICITÉ France
Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin (jf.guillotin@pourlascience.fr), assisté de Nada Mellouk-Raja
Tél. : 01 55 42 84 28 ou 01 55 42 84 97 • Fax : 01 43 25 18 29
SERVICE ABONNEMENTS
Ginette Bouffaré. Tél. : 01 55 42 84 04
Espace abonnements :
http://tinyurl.com/abonnements-pourlascience
Adresse e-mail : abonnements@pourlascience.fr
Service des abonnements - 8 rue Férou - 75278 Paris cedex 06
Commande de livres ou de magazines :
0805 655 255 (numéro vert)
DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE
Contact kiosques : À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet
Tel : 04 88 15 12 41
Canada : Edipresse : 945, avenue Beaumont, Montréal, Québec, H3N 1W3 Canada.
Suisse : Servidis : Chemin des châlets, 1979 Chavannes - 2 - Bogis
Belgique : La Caravelle : 303, rue du Pré-aux-oies - 1130 Bruxelles.
Autres pays : Éditions Belin : 8, rue Férou - 75278 Paris Cedex 06.
SCIENTIFIC AMERICAN Editor in chief : Mariette DiChristina. Editors : Fred Guterl, Ricky Rusting, Philip Yam, Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong. President : Steven Inchcoombe. Executive Vice President : Michael Florek.

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

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

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

OJD
PRESSE PAYANTE
Diffusion Certifiée
2012

de Françoise Pétry directrice de la rédaction

Représentations spécieuses

Quand nous utilisons des représentations – des billes pour figurer les particules, constituants de la matière, par exemple –, elles deviennent les supports de nos raisonnements. Mais véhiculent-elles une quelconque réalité ? Selon Emmanuel Kant (1724-1804), nous n'avons pas accès aux choses telles qu'elles sont – les « choses en soi », qu'il nomme aussi le monde *a priori* –, indépendamment de notre expérience sensible, nos intuitions. Et le philosophe postula que l'espace est une « représentation nécessaire *a priori* qui sert de fondement à toutes les intuitions ». Ce serait aussi le cas du temps. L'espace et le temps structureraient nos intuitions.

Les questions que se posent les physiciens théoriciens du XXIe siècle rejoignent celles que soulevait Kant. Considérer les particules comme des billes qui interagissent par le biais de champs n'est pas une « représentation nécessaire *a priori* » : en physique quantique, la notion de particule matérielle localisée perd son sens. Dès lors, des physiciens proposent d'interpréter les objets comme des ensembles de propriétés, telles que couleur ou forme, ces dernières ayant une existence indépendamment des objets qui en sont dotés *(voir Particules et champs sont-ils réels ?, page 56)*.

Des physiciens proposent d'interpréter les objets comme des ensembles de propriétés.

De même, Dmitri Mendeleïev (1834-1907) avait imaginé un tableau pour classer tous les éléments d'après leurs propriétés chimiques, faisant même l'hypothèse que les cases vides à son époque finiraient par être remplies, prévision qui se vérifia. Toutefois, cette classification semble avoir atteint ses limites. Les propriétés des éléments reposent sur la répartition des électrons sur des « orbites ». Mais alors qu'on peut admettre que les orbites des planètes du Système solaire sont stables, les orbitales atomiques subissent des effets relativistes qui modifient leur forme et, par conséquent, les propriétés des éléments. La représentation de Mendeleïev ne résistera peut-être pas à la découverte d'éléments superlourds *(voir Des failles dans le tableau périodique, page 66)*.

Pour les chimistes, le tableau de la classification périodique des éléments serait-il une… œuvre d'art ? Peut-être, puisque Kant soutenait que « L'art ne veut pas la représentation d'une chose belle, mais la belle représentation d'une chose. » ■

SOMMAIRE

1 EDITO

4 BLOC-NOTES
Didier Nordon

Actualités

6 Un pulsar pour sonder le trou noir galactique

7 Des minicerveaux humains en culture

11 Superinterféromètre atomique

12 Un volcan de boue né d'un séisme lointain

.. et bien d'autres sujets.

Opinions

16 POINT DE VUE
Refonder une école ambitieuse et diversifiée
Jean-Pierre Demailly

17 DÉVELOPPEMENT DURABLE
La biodiversité n'est pas qu'une affaire de points chauds !
Stéphanie Carrière

20 VRAI OU FAUX
Cadavres : une décomposition ralentie ?
Jean-Pol Beauthier

22 ENTRETIEN
Maître et élève : la transmission d'une passion
Nicole Le Douarin évoque son parcours de chercheur avec une de ses élèves, Anne-Hélène Monsoro-Burq

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

À LA UNE

24 NEUROSCIENCES
L'élagage des souvenirs pendant le sommeil

Giulio Tononi et Chiara Cirelli

Pendant le sommeil, des connexions entre cellules nerveuses seraient plus ou moins affaiblies. Ainsi, les souvenirs sans importance seraient oubliés, ce qui favoriserait l'apprentissage. De surcroît, le cerveau économiserait de l'énergie.

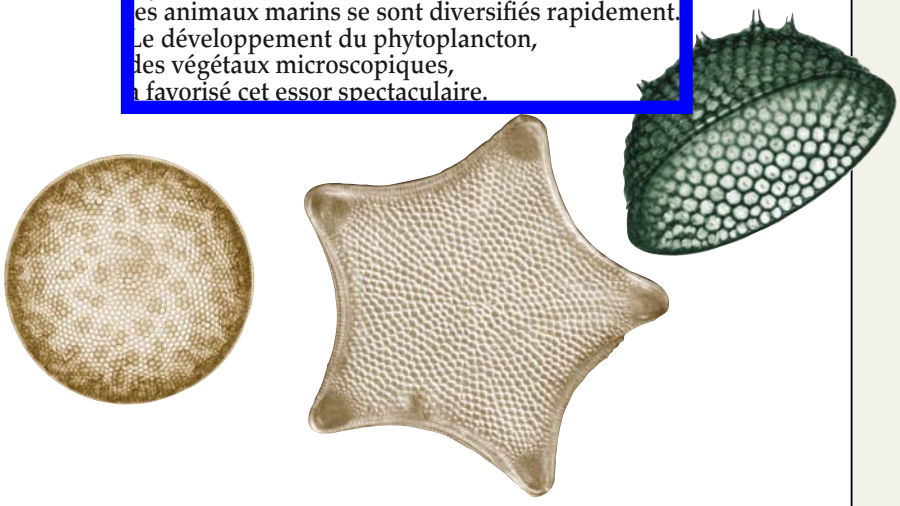
32 MÉDECINE
Des nanomédicaments pour le cerveau
Karine Andrieux et Patrick Couvreur

L'un des principaux obstacles au traitement des maladies cérébrales est la barrière très sélective qui sépare le sang et le cerveau. La nanomédecine ouvre aujourd'hui des pistes prometteuses pour la franchir.

40 ARCHÉOLOGIE
La naissance de l'écriture en Égypte
Gwenola Graff

Les gravures rupestres, les vases peints ou les sceaux de l'Égypte du IVe millénaire relèvent de cinq systèmes graphiques. Les plus anciens de ces systèmes préfigurent l'écriture hiéroglyphique

48 BIOLOGIE MARINE
Le phytoplancton, moteur de l'évolution
Ronald Martin et Antonietta Quigg
Il y a environ 250 millions d'années, les animaux marins se sont diversifiés rapidement. Le développement du phytoplancton, des végétaux microscopiques, a favorisé cet essor spectaculaire.



56 PHYSIQUE THÉORIQUE
Particules et champs sont-ils réels ?
Meinard Kuhlmann
Les physiciens nous présentent un monde constitué de particules et de champs de force. Mais ces notions posent d'importantes difficultés d'interprétation. D'après certains chercheurs, le monde serait plutôt fait de propriétés, telles que la couleur ou la forme.

66 PHYSICO-CHIMIE
Des failles dans le tableau périodique
Eric Scerri
La découverte de l'élément 117 a permis de remplir la dernière case vide dans le tableau de Mendeleïev tel que nous le connaissons. Mais ce tableau aux propriétés remarquables pourrait présenter des défauts.

Regards

72 HISTOIRE DES SCIENCES
Les « plis cachetés » de l'Académie des sciences
E. Carosella et P. Buser
Depuis 1735, il est possible de déposer à l'Académie des sciences une réflexion ou une invention sous la forme d'un pli cacheté.

78 LOGIQUE & CALCUL
La classification des pavages pentagonaux
Jean-Paul Delahaye
L'énumération des pavés convexes pentagonaux a plusieurs fois été proposée. À chaque fois, elle s'est révélée incomplète.

84 SCIENCE & FICTION
Menaces invisibles
J.-Sébastien Steyer et Roland Lehoucq

86 ART & SCIENCE
Le crochet, le corail et la géométrie
Loïc Mangin

88 IDÉES DE PHYSIQUE
Être à la même heure que les autres
Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

93 SCIENCE & GASTRONOMIE
Et si l'on utilisait des enzymes en cuisine ?
Hervé This

94 À LIRE

Nouveautés numériques

POUR LA SCIENCE .fr
le site de référence de l'actualité scientifique internationale

L'application *Pour la Science*
Retrouvez dès leurs sorties *Pour la Science* + son hors-série *Dossier Pour la Science* en version numérique optimisée

Les Petits Thématiques
Des compilations numériques fiables et pratiques sur l'actualité scientifique

www.SciLogs.fr
La nouvelle plateforme de blogs scientifiques francophones

SCIENCE | LES PETITS THÉMATIQUES | SciLogs

LE SUCCÈS DES FANFARONS

Autrefois, les enfants trop prétentieux se faisaient moucher. Soit par les adultes chargés de les élever, soit par leurs copains. Aujourd'hui, si j'avais un jeune à éduquer, je le féliciterais à chacune de ses vantardises, je l'encouragerais à les multiplier et à progresser dans cet art.

L'éducation d'un enfant doit le préparer au monde dans lequel il va vivre. Or notre société attend de chacun de nous qu'il se fasse entrepreneur de lui-même. Du bas en haut de l'échelle sociale, depuis les lettres de motivation jusqu'aux rapports d'activité, manquer d'énergie pour se faire mousser, c'est se vouer à l'échec. Le contrôle bureaucratique incite tout un chacun à rendre compte d'un travail qu'il n'a pas le temps de faire. Qui se vante bien se vend bien. On ne s'entraîne jamais assez tôt à ces exercices de frime. Le triste sort de l'entreprise *Manufrance* doit servir de leçon. Elle avait un slogan fameux : « Bien faire et le faire savoir ». Et elle a coulé. Elle aurait dû se consacrer uniquement à faire savoir, et ne pas perdre de temps à essayer de bien faire. Voilà pourquoi il faut rappeler à l'ordre un enfant qui ne cherche pas à flamber : « Ramène-la, ou tu n'arriveras à rien dans l'existence. »

Jadis, étaler une modestie plus ou moins feinte était de bon ton. Aujourd'hui, exceller aux rodomontades est reconnu comme un atout. Quelle époque est préférable ? Chacun jugera selon son goût.

HUMOUR SÉRIEUX

Il y a loin de la théorie à la pratique, c'est entendu, mais quand même : une théorie pertinente doit apporter un minimum d'aide dans la pratique. Étudiez par exemple une théorie sur l'humour. Si elle est pertinente, vous aurez le plaisir de constater qu'après, vous faites des plaisanteries beaucoup plus drôles qu'avant !

Théoriser sur l'humour, donc en parler avec sérieux, c'est estimer que le sérieux peut, avec ses méthodes, saisir ce que l'humour saisit avec les siennes. Or je crois au contraire que l'humour a ses terrains réservés. Il y a des aspects de la condition humaine que seul l'humour appréhende, tout simplement parce que – on n'y peut rien – ces aspects sont comiques.

Inversement, bien sûr, le monde présente nombre d'aspects sur lesquels l'humour n'a pas prise. Ce n'est pas en la rendant amusante que les physiciens résoudraient les difficultés sur lesquelles bute la théorie de la gravitation !

Le théoricien sérieux qui disserte sur l'humour et l'humoriste qui se gausse d'une théorie non à cause de ses failles, mais pour la seule raison que tout ce qui est sérieux passe à ses yeux pour risible, ont des attitudes plus proches qu'il n'y paraît : chacun tente d'annexer le domaine de l'autre. Éternelle « concurrence des magistères »…

NATURE… HUMAINE

Après avoir herborisé à travers champs, ramassé des champignons dans les sous-bois ou pénétré les profondeurs d'une forêt, on rentre chez soi revigoré : rien de tel qu'un bon bol d'air dans la nature.

La chose certaine, pourtant, est que ces espaces n'ont rien de naturel – en qualifiant de naturel ce qui se développe indépendamment de toute décision humaine. Surveillés, gérés, travaillés et retravaillés depuis des temps immémoriaux, ce sont des œuvres humaines : si la nature les vouait, elle n'y retrouverait pas son naturel ! On ne se promène jamais dans la nature, mais dans des « pausages non urbains ».

Si la concentration urbaine se poursuit, elle fournira une façon de dire plus élégante. Quand tout le monde vivra en ville, les paysages non urbains seront devenus de vastes étendues inhabitées. « Chaque matin, avant d'aller au travail, je fais un long jogging dans le désert », dirons-nous – et nous ne manquerons pas d'allure, sinon dans la foulée, du moins dans l'expression.

RAISON CONTRE CROYANCE

Pour l'instant, le devenir de la conscience individuelle après la mort est une question métaphysique. On peut soit penser à y répondre, soit y répondre par une croyance, on ne peut pas y répondre par une expérience ou par un raisonnement. Il paraît improbable que la science trouve un jour une voie d'accès vers cette question, mais qui sait ?

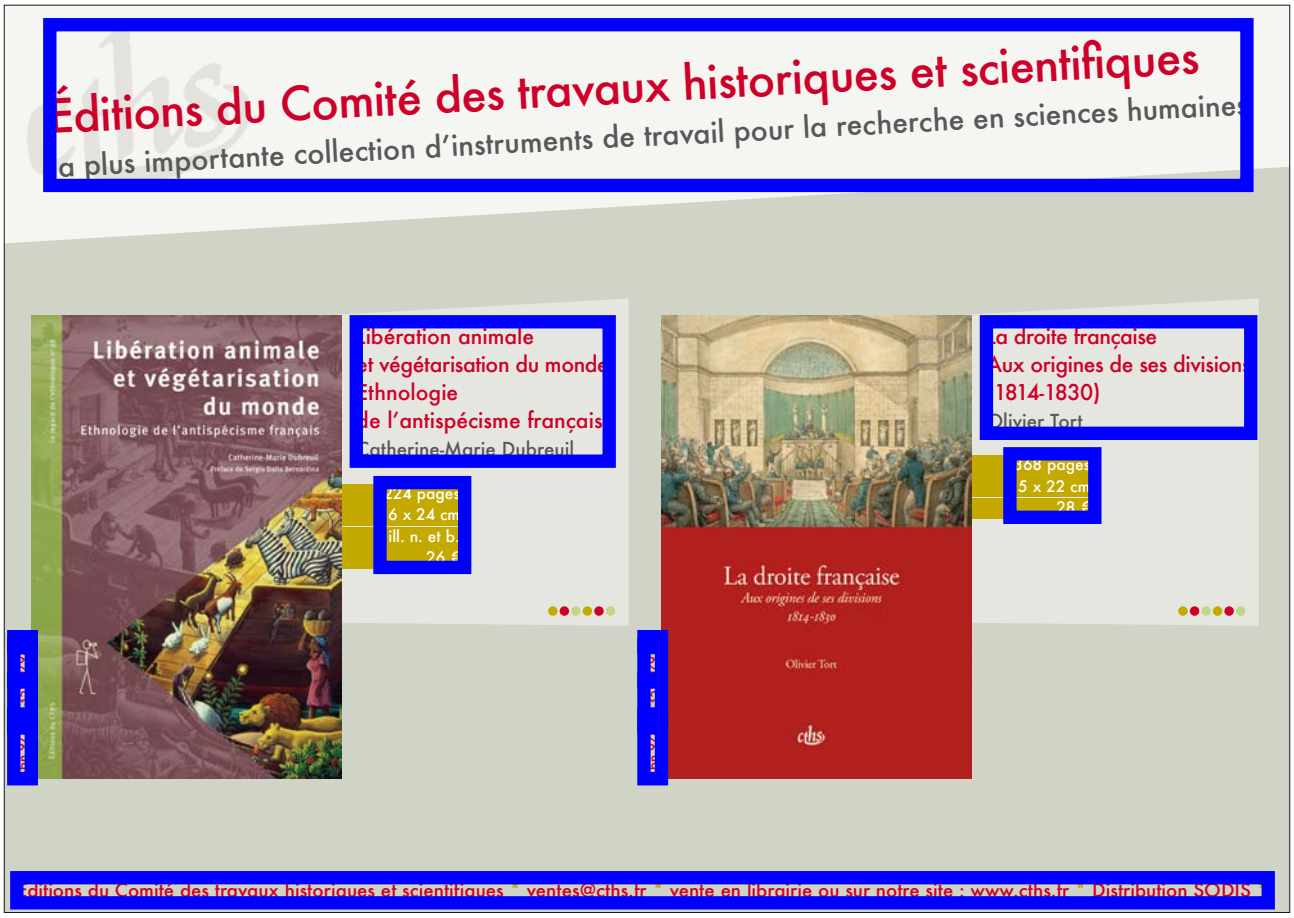
La question de l'existence d'intelligences extraterrestres, elle, est, *a priori*, scientifique : elle relève de l'exploration de l'Univers. Mais elle semble hors de portée de la science. La probabilité qu'on démontre qu'existe une intelligence extraterrestre est infinitésimale : il faudrait réussir à en rencontrer une. La probabilité qu'on démontre qu'il n'en existe aucune paraît carrément nulle : il faudrait avoir visité l'Univers jusqu'en ses confins les plus éloignés. Ainsi, il est quasiment certain qu'on ne saura jamais. Cela en fait une question métaphysique : on ne peut y répondre qu'au nom d'une croyance.

Vouloir répondre à une question scientifique est rationnel. Se garder de répondre à une question métaphysique est rationnel. Mais il arrive qu'on ne sache pas si une question est scientifique ou métaphysique, donc qu'on ne sache pas si la raison commande d'y chercher une réponse ou de s'en abstenir.

➜ UN MAIGRE BLANC

Maigre. Quel drôle de nom pour un poisson ! Interrompons le repas, consultons le *Grand Robert*. L'article commence par une citation, due au philologue Randle Cotgrave : « Non que ce poisson soit maigre, mais parce que la blancheur de sa chair le fait paraître tel. » Comment interpréter ? S'agit-il d'un pur effet visuel dû à la couleur blanche ou doit-on entendre que, lors du carême, le poisson permet aux hypocrites de manger gras tout en ayant l'air de faire maigre ? Pour savoir, téléchargeons le dictionnaire français-anglais que Cotgrave a publié en 1611. À l'article maigre, se trouve bien la phrase du *Robert*. Mais elle est en anglais du XVII[e] siècle. La comprendre à peu près est facile, discerner ses éventuels sous-entendus l'est moins !

Tant pis, oublions Cotgrave et revenons au *Robert*. Le maigre est une scène, et il est également appelé nègre, nous enseigne-t-il. Curieux, s'agissant d'un poisson remarquable par sa blancheur. Quant au mot scène, il désigne un poisson acanthoptérygien. Quelle merveille d'expressivité ! Les sonorités de ce mot coïncident avec la réalité qu'il désigne. Hostile et rugueux, il m'a précipité, quand je l'ai lu, dans un monde aussi inhospitalier que les abysses où évoluent les poissons. Un homme mangeant un acanthoptérygien, c'est la rencontre terrifiante de deux univers séparés par des abîmes. Gardons-nous de lire l'article acanthoptérygien. Nous y apprendrions que le terme s'applique aux poissons possédant des rayons épineux aux nageoires... Ce savoir-là est moins exaltant que la vision conçue par l'ignorance. ■



Astrophysique

Un pulsar pour sonder le trou noir galactique

Grâce à la découverte récente d'un pulsar situé à proximité du trou noir central de la Voie lactée, les astrophysiciens ont pu caractériser le champ magnétique régnant dans cette région.

Une équipe d'astronomes a utilisé le radiotélescope d'Effelsberg *(à gauche)*, en Allemagne, pour mesurer la polarisation du rayonnement émis par un pulsar *(à droite, vue d'artiste)* proche du trou noir supermassif de la Galaxie. Cette polarisation renseigne sur l'intensité du champ magnétique dans les environs du trou noir.

Le centre de la Voie lactée ne se dévoile pas facilement. De grandes quantités de gaz et de poussière en font une région très opaque. Cependant, plusieurs observations ont montré qu'un trou noir supermassif, de près de quatre millions de fois la masse du Soleil, y est tapi et y capte la matière environnante. D'après les modèles, des champs magnétiques parcourent le gaz et la poussière en accrétion, mais il est difficile d'en mesurer les caractéristiques. Toutefois, la découverte récente d'un pulsar très proche du trou noir a permis à Ralph Eatough, de l'Institut Max Planck à Bonn, et ses collègues de mesurer le champ magnétique dans un nuage de poussière à proximité du trou noir.

En avril 2013, le satellite *Swift* a détecté une émission de rayons X provenant du centre de la Galaxie. Les astronomes ont montré que ce signal était périodique. D'autres observatoires ont alors été mobilisés et ont obtenu des résultats similaires dans le domaine radio. La source s'est révélée être un pulsar, qui serait situé à moins de 0,5 année-lumière du trou noir supermassif. Cette étoile à neutrons, qui tourne rapidement sur elle-même, a un champ magnétique intense, de l'ordre de 10^8 teslas (10^{12} fois celui du champ magnétique terrestre !). Il s'agit d'un magnétar, type d'astre dont on ne connaît aujourd'hui qu'une vingtaine d'exemplaires.

Les ondes radio émises par le magnétar sont polarisées. Cela signifie que la direction dans laquelle le champ électrique des ondes oscille est bien définie. R. Eatough et ses collègues ont utilisé cette émission pour sonder le champ magnétique de la matière autour du trou noir supermassif. Lorsque cette « lumière » polarisée traverse le champ magnétique d'un milieu matériel, elle subit l'effet Faraday : la direction de polarisation de l'onde tourne d'un angle proportionnel à l'intensité du champ magnétique (plus précisément, de sa composante le long de la direction de propagation). Les astrophysiciens ont mesuré cet angle de rotation dans trois bandes de fréquences du rayonnement. Ils ont ainsi pu partiellement caractériser le champ magnétique dans la matière proche du trou noir, et les résultats sont compatibles avec les modèles théoriques.

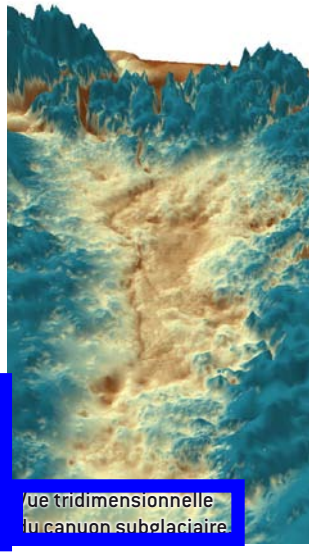
Le champ magnétique joue un rôle important dans l'écoulement de la matière aspirée par le trou noir. En suivant la progression du pulsar autour de cet astre central, les astronomes pourront cartographier le champ magnétique et mieux comprendre la dynamique de l'accrétion de la matière sur le trou noir supermassif.

→ Sean Bailly

Nature, en ligne le 14 août 2013

Géologie

Un canyon géant sous le Groenland



Vue tridimensionnelle du canyon subglaciaire

Un canyon qui atteint 800 mètres de profondeur et 10 kilomètres de largeur court sous la calotte glaciaire du Groenland, du centre jusqu'à la côte Nord, soit une longueur de plus de 750 kilomètres. C'est ce qu'ont montré Jonathan Bamber, de l'Université de Bristol, au Royaume-Uni, et ses collègues.

Les chercheurs ont compilé plusieurs décennies de données radar obtenues par avion (à certaines fréquences, les ondes électromagnétiques pénètrent dans la glace et sont réfléchies par le sol). Ils ont ainsi reconstitué la topographie de cette partie de la grande île.

Le canyon serait plus ancien que la calotte glaciaire et aurait joué un rôle majeur dans l'hydrographie du Groenland. La chaleur géothermique faisant en partie fondre la glace, de l'eau liquide se forme sur le sol de l'île. Le canyon participerait à son évacuation, ce qui expliquerait que le liquide ne forme pas de lacs subglaciaires comme en Antarctique. En outre, ce canyon pourrait avoir influé sur l'évolution de la calotte, dont la glace s'écoule vers la mer d'une façon qui dépend de la topographie et de l'hydrographie sous-jacentes.

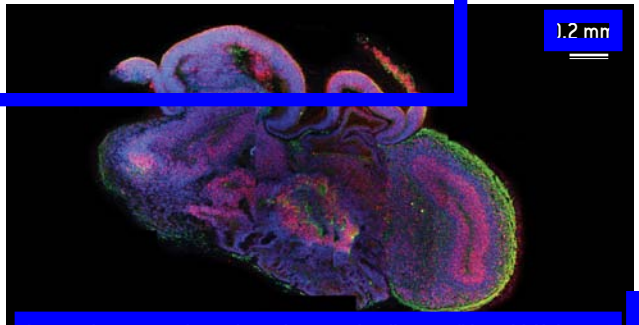
→ Guillaume Jacquemont

Science, en ligne le 29 août 201

Neurobiologie

Des minicerveaux humains en culture

S'il l'on sait former *in vitro*, à partir de cellules souches humaines, des tissus constituant des modèles tridimensionnels de l'intestin, de l'hypophyse et de la rétine, le cerveau semblait hors de portée… jusqu'à aujourd'hui. Madeline Lancaster, de l'Institut de biotechnologie moléculaire de l'Académie des sciences autrichienne, à Vienne, et ses collègues ont mis au point des conditions qui leur permettent de faire croître des « cerveaux miniatures », qu'ils nomment organoïdes cérébraux.



Comme le cerveau humain embryonnaire, l'organoïde créé *(ici vu en coupe)* présente des régions riches en cellules souches neurales *(en rouge)* et d'autres en neurones *(en vert)*.

Divers travaux avaient montré la capacité de cellules neurales dérivées de cellules souches, notamment des neurones fonctionnels du cortex, à s'auto-organiser. Les biologistes ont obtenu un développement plus tardif de telles structures grâce à des techniques de culture précédemment utilisées pour des embryons.

Ils sont partis de cellules souches pluripotentes (capables de se différencier en tout type cellulaire) qu'ils avaient produites soit à partir de cellules souches embryonnaires humaines, soit en reprogrammant des cellules différenciées d'individus adultes. Après 20 à 30 jours de culture, les cellules formaient des agrégats structurés d'au plus quatre millimètres, dont l'organisation et l'architecture rappellent celles du cortex cérébral humain aux stades précoces du développement. Ces minicerveaux peuvent être maintenus plusieurs mois en culture.

Les organoïdes cérébraux offrent un modèle tridimensionnel du développement cérébral humain, ainsi qu'un outil pour étudier certaines pathologies du développement neuronal, telle la microcéphalie.

→ Marie-Neige Cordonnier

Nature, en ligne le 29 août 201

En bref

Vers un vaccin antipaludique

Le paludisme tue chaque année plus de 600 000 personnes dans le monde. Un vaccin expérimental nommé PfSPZ a passé avec succès la première phase des tests cliniques. Composé de sporozoïtes (des cellules infectieuses du parasite responsable de la maladie) affaiblis, il a déclenché une réponse immunitaire spécifique. Les sujets en ayant reçu une dose suffisante n'ont pas été contaminés par des piqûres de moustiques infectés. Le vaccin reste à perfectionner et à tester à plus grande échelle.

Mutations à mucoviscidose

La mucoviscidose touche plus de 70 000 personnes dans le monde. Un mucus épais se forme dans les poumons et le système digestif à cause d'une protéine anormale. On connaît près de 2 000 mutations possibles sur le gène qui code cette protéine, mais toutes ne provoquent pas la maladie. Patrick Sosnay, de l'Université Johns Hopkins, et ses collègues ont étudié le génotype de 40 000 personnes atteintes de la maladie et ont porté de 22 à 127 le nombre de mutations qui en sont responsables.

Goûter la température

Les animaux perçoivent la température *via* un ensemble de mécanismes thermosensitifs. Des chercheurs américains ont découvert qu'un récepteur gustatif (une protéine membranaire nommée GR28B) est impliqué dans cette perception chez la drosophile. Ils ont modifié génétiquement les insectes pour qu'ils produisent une version dysfonctionnelle de la protéine GR28B. Confrontées à des tubes chauffés à différentes températures, les drosophiles ne préféraient plus celui qui avait une température optimale pour elles.

En bref

Aux origines de la parure

Une équipe essentiellement franco-allemande, menée par Marie Soressi et Shannon McPherron, a identifié dans deux sites du Sud-Ouest de la France des lissoirs en os de cerf fabriqués par des Néandertaliens. Datant d'environ 50 000 ans, ce sont les plus anciens outils spécialisés en os connus d'Europe. Ils sont même antérieurs à la plus ancienne preuve de la présence de l'homme moderne en Europe occidentale. Ce dernier a-t-il acquis la technique des Néandertaliens ?

Les chiens empathiques

Plusieurs travaux ont montré que la plupart des chiens bâillent quand ils voient un humain bâiller. Selon une étude de Teresa Romero et ses collègues, à Tokyo, ils le font plus souvent quand c'est leur maître qui bâille qu'un inconnu. Ce serait dû à une implication des réseaux neuronaux sous-tendant l'empathie (une capacité partagée par tous les mammifères). Ces réseaux sont aussi associés à la contagion du bâillement chez les humains et d'autres primates, contagion plus fréquente quand les sujets ont des liens affectifs.

Environnement

Le mercure, absorbé dans les profondeurs

Le mercure est un polluant neurotoxique. L'homme y est exposé surtout par la consommation de poissons qui l'absorbent et l'accumulent dans leur chair. Pour mieux comprendre le cycle du mercure, Joel Blum, de l'Université du Michigan, et ses collègues de l'Université de Hawaï ont prélevé des poissons dans les eaux hawaïennes et ont étudié leur concentration en mercure. Ils ont ainsi évalué l'importance des réactions qui permettent l'assimilation du mercure et à quelle profondeur ces processus se déroulent.

Dans l'océan, le mercure est surtout présent sous forme dissoute inorganique. Certaines bactéries peuvent, par des réactions de méthylation, produire du méthylmercure (CH_3Hg^+). C'est cette forme, très toxique, qui s'accumule dans les algues et les micro-organismes dont se nourrissent les petits poissons, lesquels sont à leur tour mangés par les prédateurs.

Deux processus peuvent détruire le méthylmercure avant qu'il ne pénètre dans la chaîne alimentaire : des réactions déclenchées par la lumière du Soleil et des processus bactériens.

Pour évaluer leur importance, J. Blum et ses collègues ont analysé la chair de neuf espèces de poissons (tel l'espadon, *ci-dessus*), vivant à différentes profondeurs et ayant diverses positions dans la chaîne alimentaire, et étudié leur composition en trois isotopes stables du mercure.

Les réactions de synthèse et de destruction du méthylmercure influant de différentes façons sur les concentrations de ces isotopes, les chercheurs ont montré que les réactions photochimiques détruisent de 46 à 80 pour cent du méthylmercure à faible profondeur. En revanche, 60 à 80 pour cent du méthylmercure accumulé par les poissons provient d'une région comprise entre 50 et 400 mètres de profondeur, où la lumière pénètre moins.

Comprendre le cycle du mercure peut être un facteur important pour la réglementation de la pêche. D'autant que, d'après certaines projections, les concentrations de mercure dans les océans pourraient doubler d'ici 2050 par rapport aux valeurs de 1995.

→ S. B.

J. D. Blum et al., Nature Geoscience, en ligne le 25 août 2013

Psychologie

Le prix cognitif de la pauvreté

La pauvreté n'est pas une vocation. La plupart des gens pauvres veulent sortir de cette condition. Ils n'y parviennent pas souvent. Pourquoi ? Au-delà des facteurs sociaux, un mécanisme cognitif pourrait jouer un rôle : la pauvreté entraîne par elle-même une diminution des capacités cognitives. C'est ce que suggèrent les travaux d'Anandi Mani, de l'Université de Warwick, en Grande-Bretagne, et de ses collègues.

Dans une première expérience, les chercheurs ont demandé à 101 personnes de réfléchir à des problèmes financiers du quotidien. Les participants effectuaient ensuite des tâches sur ordinateur, servant à mesurer leurs capacités cognitives.

Les participants ayant un faible revenu réussissaient moins bien les tests lorsque le coût financier du problème envisagé était élevé. En revanche, les participants aisés montraient les mêmes capacités cognitives, que ce coût soit élevé ou modéré.

Une seconde expérience, portant sur 464 cultivateurs de canne à sucre en Inde, a révélé qu'ils obtiennent de moins bons résultats aux tests cognitifs avant la récolte, dans une situation financière précaire, qu'après avoir vendu leur récolte.

D'où vient cette baisse des capacités cognitives ? Pour les chercheurs, de l'épuisement des ressources cognitives : les préoccupations financières consomment des ressources cognitives, lesquelles ne sont pas inépuisables, ce qui altère la capacité à réaliser d'autres tâches.

Les personnes pauvres, plus souvent confrontées à des problèmes financiers, épuiseraient ainsi davantage leurs ressources cognitives, ce qui les conduirait à faire des mauvais choix, perpétuant leur condition défavorable. La pauvreté, un cercle vicieux ?

→ Philippe Ribeau-Gésippe

Science, vol. 341, pp. 976-980, 2013

Les préoccupations financières des pauvres mobilisent des ressources cognitives, ce qui ajoute un handicap à la pauvreté

© Pour la Science - n° 432 - Octobre 2013

Neurosciences

Le niveau de conscience mesuré

Les examens cliniques visant à déterminer si un sujet qui semble inconscient l'est réellement reposent sur sa capacité à interagir avec son environnement : par exemple, le médecin lui demande de saisir sa main. Mais de nombreuses lésions cérébrales font perdre au patient cette capacité. Peut-on alors quantifier le niveau de conscience directement, *via* la mesure de l'activité cérébrale ? C'est ce qu'ont réalisé Adenauer Casali, de l'Université de Milan, Olivia Gosseries, de l'Université de Liège, et leurs collègues : ils ont mis au point un indice du niveau de conscience, le PCI, ou *Perturbational Complexity Index* (indice de complexité perturbationnelle).

Il est de plus en plus admis que la conscience nécessite l'interaction de multiples zones du cerveau. Les neurobiologistes ont postulé que plus un sujet est conscient, plus ses réponses cérébrales impliquent des activations nombreuses, spatialement distinctes, interdépendantes et variées. Le principe de la nouvelle méthode est alors de quantifier la complexité de la réaction cérébrale à une stimulation externe, en l'occurrence une impulsion magnétique appliquée sur le crâne (stimulation magnétique transcrânienne, ou TMS). Cette réaction a été mesurée par électroencéphalographie, grâce à de multiples électrodes, ce qui a permis de reconstituer les aires cérébrales activées par la TMS.

De précédentes études avaient déjà montré que les réponses cérébrales à une TMS diffèrent selon le niveau de conscience, mais sans que l'on ait quantifié le phénomène. Les neurobiologistes ont construit une matrice (un tableau) traduisant le schéma d'activation spatio-temporelle du cerveau, c'est-à-dire quelles zones s'activent et à quels moments. Ils ont ensuite établi un indice, le PCI, qui mesure la complexité de cette matrice – et donc de la réponse cérébrale.

Il existe différents états de conscience altérée : le sommeil, le coma, l'état végétatif ou syndrome d'éveil non répondant (les patients sont éveillés, mais inconscients), etc. Les chercheurs ont calculé le PCI pour plusieurs de ces états. Dans tous les cas, c'était un reflet fiable du niveau de conscience. Le PCI traduit aussi bien les variations graduelles de ce niveau (l'indice diminue par exemple progressivement lors d'une anesthésie générale) que les ruptures brusques.

Cette méthode reste à améliorer et à tester sur un plus grand nombre de sujets ; mais à l'avenir, elle pourrait fournir un outil de diagnostic précieux.

→ G. J.

A. Casali et al., *Science Translational Medicine*, en ligne le 14 août 2013

VIGIENATURE École

Un réseau d'élèves qui fait avancer la science !

VIGIENATURE-ECOLE.FR

A travers des protocoles simples et rigoureux, Vigie-Nature École propose aux élèves, du primaire au lycée, de rejoindre un programme de sciences participatives sur la nature ordinaire.

ENSEIGNER DIFFEREMENT LA BIODIVERSITE

Volet scolaire du programme de sciences participatives du Muséum national d'Histoire naturelle, Vigie-Nature École répond à plusieurs objectifs : sensibiliser les élèves à l'étude de la biodiversité ordinaire ; appliquer une véritable démarche scientifique via la participation à un projet de recherche national.

Vigie-Nature École est l'occasion d'organiser des sorties de terrain à proximité de l'établissement favorisant ainsi le contact direct avec la nature. L'originalité du programme réside également dans la relation qui s'établit entre élèves, enseignants et scientifiques.

Participer à Vigie-Nature École est donc un excellent point de départ pour l'éducation au développement durable.

CHAQUE OBSERVATION COMPTE, REJOIGNEZ-NOUS

Vigie-Nature École, un programme fondé par

contenu par décène

MUSÉUM naturepariif SCEREN [CNDP-CRDP] académie de Paris

GRENOBLE SCIENCES

ET LES SCIENCES CHIMIQUES

■ L'incontournable pour le scientifique et l'ingénieur.

■ L'ouvrage de base complet de la chimie organométallique moderne et de la catalyse.

■ ET D'AUTRES TITRES CONNUS

■ GRENOBLE SCIENCES

http://www.grenoble-sciences.com

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

Université Joseph Fourier GRENOBLE

Région RhôneAlpes

Zoologie

Un nouveau requin marcheur

Gerald Allen, ichtyologiste au Muséum d'Australie occidentale, vient de décrire avec ses collègues Mark Erdmann et Christine Dudgeon une nouvelle espèce de requin des eaux de l'Est de l'Indonésie. Il s'agit d'un requin-chabot de la famille des *Hemiscylliidae*, qui comprend désormais 17 espèces. Comme certaines autres espèces de ce groupe, le nouveau requin, nommé *Hemiscyllium halmahera*, a un mode de locomotion surprenant : ses nageoires lui servent moins à nager qu'à marcher sur le fond rocheux ou recouvert de coraux. Long d'environ 70 centimètres, ce squale ressemble à *Hemiscyllium galei*, une espèce de Papouasie occidentale décrite en 2008 par G. Allen et M. Erdmann.

→ M. M.

G. R. Allen et al., aqua, International Journal of Ichtyology, vol. 19(3), pp. 123-136, 2013

Hemiscullium halmahera

Psychologie sociale

Facebook diminue le bien-être

Plus de 500 millions de personnes interagissent chaque jour sur *Facebook*. Quel est l'impact sur leur bien-être subjectif ? Pour le savoir, des psychologues de l'Université du Michigan à Ann Arbor, et de l'Université de Louvain en Belgique, ont demandé cinq fois par jour pendant deux semaines à 83 utilisateurs comment ils se sentaient à l'instant présent et s'ils étaient satisfaits de leur vie.

Ils ont constaté que plus une personne utilisait *Facebook* entre deux questions, moins bien elle se sentait ensuite. Et plus elle interagissait sur le réseau social pendant les deux semaines, plus son niveau de satisfaction avait diminué à la fin. L'usage de *Facebook* aurait ainsi un impact négatif sur le bien-être ressenti. Cet effet ne dépendrait pas du nombre de contacts, ni des motivations pour utiliser le réseau social. Par ailleurs, il ne se manifeste pas après des contacts « directs ».

→ Ph. R.-G.

E. Kross et al., PLoS One, vol. 8(8), e69841, 2013

Physique

Superinterféromètre atomique

Comme pour les photons, il existe une onde associée aux atomes, lesquels peuvent donc interférer. Susannah Dickerson et ses collègues, à l'Université Stanford, viennent de proposer un dispositif astucieux d'interférométrie atomique, qui permet de mesurer des accélérations avec une sensibilité 100 fois supérieure à ce que l'on atteignait auparavant.

Le principe de l'interférométrie atomique est simple : comme pour l'interférométrie optique, l'onde est dédoublée, de sorte que ses deux composantes effectuent des trajets différents, puis celles-ci sont recombinées. En fonction de leur déphasage en chaque point, l'interférence est constructive ou destructive, ce qui produit des franges d'interférence.

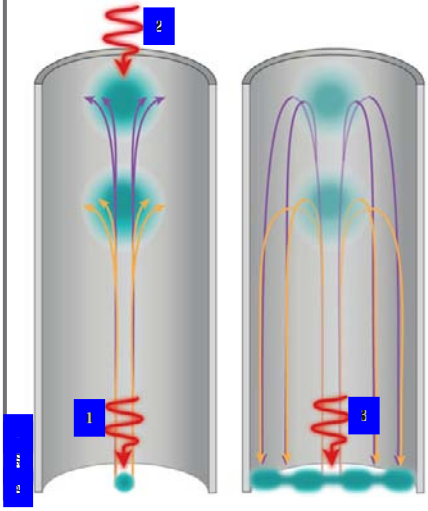
Dans le dispositif de Stanford, on part d'un nuage de quelques millions d'atomes de rubidium refroidis à 50 nanokelvins. Un laser approprié propulse ce nuage, qui mesure initialement 0,2 millimètre de diamètre, vers le haut. Puis une impulsion laser le dédouble, pour chaque atome, en deux ondes de vitesses légèrement différentes. Cela se déroule dans une enceinte à vide haute de dix mètres. Quand les deux ondes atomiques atteignent le sommet, environ une seconde après, une deuxième impulsion laser faisant office de miroir est appliquée. Les deux nuages retombent, avec des vitesses échangées grâce à l'impulsion laser. Une troisième impulsion les recombine au bas de l'enceinte où, enfin, un laser excite la fluorescence des atomes, détectée par deux caméras CCD qui enregistrent ainsi les franges d'interférence.

Cette technique présente deux grands atouts. D'une part, le temps de vol des atomes est long (2,3 secondes), ce qui rend les franges très sensibles aux accélérations ou rotations subies par l'interféromètre. D'autre part, la taille du nuage atomique à la fin du trajet, 30 fois supérieure à sa taille initiale (expansion due à l'hétérogénéité des vitesses des atomes), permet aux caméras d'enregistrer la figure d'interférence de façon très détaillée.

L'interféromètre atteint ainsi une sensibilité de $6{,}7 \times 10^{-12}\ g$, et il a permis à ses concepteurs de mesurer la vitesse de rotation de la Terre avec une précision de 0,2 milliradian par seconde.

→ Maurice Mashaal

Phys. Rev. Lett., vol. 111, 083001, 2013



Une impulsion laser *(1)* dédouble les ondes du nuage atomique *(en bleu)* propulsé vers le haut. Une deuxième impulsion *(2)* fait miroir et inverse leurs vitesses. Les deux paquets d'ondes se recombinent en bas grâce à une troisième impulsion laser *(3)*. Les interférences sont visualisées à l'aide d'un laser qui excite les atomes.

En bref

Le fer égyptien de l'espace

Les plus vieux éléments de fer travaillé par l'homme datent de 3 200 ans avant notre ère, mais leur fer vient de l'espace. Petites plaques enroulées pour former des cylindres, ces éléments servaient de perles pour un collier. Ils ont été trouvés en 1911 dans deux tombes à Gerzeh, en Égypte. Thilo Rehren, de l'Université Hamad bin Khalifa, au Qatar, et ses collègues ont analysé aux rayons X ces perles. Le fer présente des traces de cobalt et de germanium, une composition caractéristique du fer de météorites.

Flore intestinale et obésité

La diversité des bactéries intestinales influe sur l'obésité et ses complications : c'est ce qu'ont montré deux études internationales conduites par l'INRA, l'INSERM et l'UPMC, l'une sur 292 adultes danois, dont 169 obèses, l'autre sur 49 adultes français obèses ou en surpoids. Les personnes présentant une faible diversité bactérienne ont un risque accru de prendre du poids et de développer des complications liées à l'obésité. Un régime pauvre en calories améliore leur état de santé et leur diversité bactérienne.

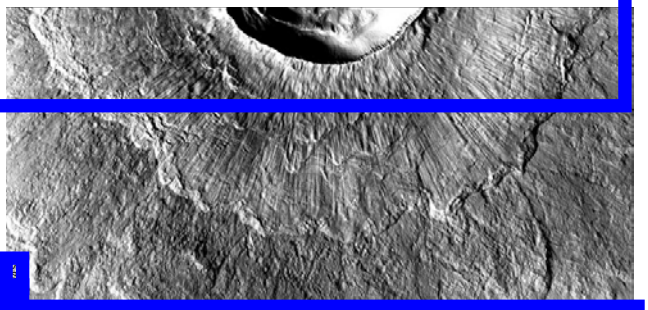
Astrophysique

Mars : les cratères à double couronne expliqués

Parmi les cratères martiens, plusieurs centaines ont une structure singulière, avec une double couronne d'éjectas. David Weiss et James Head, de l'Université Brown, aux États-Unis, ont proposé une explication qui met en avant le rôle d'épaisses couches de glaces qui recouvraient la région lors de l'impact des météorites.

Les deux chercheurs ont remarqué que ces cratères sont surtout répartis dans les latitudes moyennes. Pendant certaines périodes glaciaires, ces régions étaient couvertes de glace et de neige sur des épaisseurs de plusieurs dizaines de mètres. Lors d'un impact de météorite, une partie du sol est repoussée pour former le cratère et la crête qui l'entoure. Une autre partie des matériaux est éjectée et se dépose tout autour du cratère. Le versant extérieur de la crête, plus ou moins abrupt, est alors recouvert d'abord d'une couche de glace, puis d'une couche d'éjectas. La glace étant glissante, les éjectas situés sur la partie la plus haute et la plus abrupte de la crête sont instables et finissent par glisser. Ils recouvrent les éjectas en contrebas et forment ainsi la seconde couronne de débris.

D. Weiss et J. Head ont calculé que seuls les cratères de moins de 25 kilomètres de diamètre peuvent présenter une double couronne. En effet, les cratères plus larges ont des versants peu pentus, qui ne provoquent pas de glissements de terrain. L'étude des 600 cratères à double couronne confirme l'estimation des chercheurs. Le mystère de ces doubles couronnes semble ainsi résolu.



Photographie d'un cratère d'impact de météorite à double couronne de débris sur Mars. La glace qui recouvrait la zone où est tombée la météorite a eu un rôle important dans l'aspect final du cratère.

→ S. B.

Geophysical Research Letters, vol. 40(15), pp. 3819-3824, 2013

Géophysique

Un volcan de boue né d'un séisme lointain

Le 28 mai 2006, sur l'île de Java, en Indonésie, un volcan de boue se réveille à Sidoarjo. Il émet des jets à plus de 50 mètres de haut et inonde les habitations des environs. Deux facteurs pourraient avoir déclenché le phénomène : un forage gazier à proximité ou un séisme. Ce dernier semblait trop loin pour avoir eu un rôle. Mais Matteo Lupi, de l'Université de Bonn, en Allemagne, et ses collègues ont montré que la configuration du sous-sol a pu localiser les ondes sismiques et provoquer l'éruption de boue.

Le séisme, de magnitude 6,3, s'est produit le 26 mai. Pour de nombreux spécialistes, le tremblement de terre était trop éloigné pour avoir eu une influence, car son épicentre était distant de 250 kilomètres. Toutefois, le volcan Semeru, à 300 kilomètres de l'épicentre, a connu un regain d'activité lié au séisme. Il n'était donc pas exclu que les ondes sismiques aient aussi joué un rôle dans l'éruption de boue.

M. Lupi et ses collègues ont modélisé le sous-sol de la région et ont étudié la propagation des ondes sismiques. Le sous-sol est constitué de différentes couches, en particulier une strate d'argile à près de 2 000 mètres de profondeur, comprise entre une couche de roche volcanique et un mélange de sable et de schiste. Sous l'action de différentes tensions, les strates se sont déformées bien avant l'éruption, pour constituer un dôme. Les chercheurs ont montré que cette configuration, associée aux caractéristiques des couches où les ondes sismiques se propagent à différentes vitesses), a pu amplifier les ondes sismiques et localiser leur énergie dans l'argile. Cette dernière s'est alors liquéfiée, puis a atteint la surface, provoquant l'éruption de boue. Ainsi, l'activité du forage gazier a pu exacerber la situation, mais n'en serait pas la cause première.

Cette image satellite montre, au centre, le lac de plusieurs kilomètres carrés alimenté par l'éruption de boue. Celle-ci pourrait encore durer 25 ans, selon certains spécialistes.

→ S. B.

Nature Geoscience, vol. 6, pp. 642-646, 2013

© Pour la Science - n° 432 - Octobre 2013

FONDATION ÉCOLOGIE D'AVENIR

INSTITUT DE FRANCE

COLLOQUE

LES COMBUSTIBLES DU FUTUR: LE RENOUVEAU DES GAZ

SOUS LA DIRECTION DE PASCAL COLOMBANI ET CHRISTIAN AMATORE

Avec la participation de:

Festa Capella (AIE), Marc Fontecave (Collège de France), Alain Prinzhofer (HRT), Satish Singh (IPGP), Mark Zoback (Stanford university)...

Jeudi 7 novembre 2013

15H-19H

LA MAISON DU BARREAU

2 RUE DE HARLEY - 75001 PARIS

WWW.FONDATIONECOLOGIEDAVENIR.ORG

Entrée gratuite - réservation obligatoire

Planétologie

Titan : une croûte bien dure

Titan, satellite de Saturne, est recouvert d'une croûte de glace de 50 à 200 kilomètres d'épaisseur sous laquelle se cacherait un océan d'eau liquide. Selon Francis Nimmo, de l'Université de Californie à Santa Cruz, et trois collègues, cette croûte serait plus rigide qu'on ne le pensait et géologiquement peu active.

Des mesures de la sonde *Cassini* ont révélé que la gravité à la surface est plus faible là où il y a des reliefs. Pour expliquer ces anomalies, les chercheurs ont imaginé qu'aux reliefs correspondent de grosses « racines » à la base de la croûte. La glace étant moins dense que l'eau de l'océan subglaciaire, une racine se traduit par un déficit de masse, qui contrebalance la gravité du relief. Cependant, ces masses de glace flottent et poussent sur la croûte. Pour que celle-ci soit en équilibre, il faut alors qu'elle soit assez épaisse et très rigide. De quoi étouffer dans l'œuf l'idée de volcans de glace à la surface de Titan...

→ Ph. R.-G.

D. Hemingway et al., Nature, vol. 500, pp. 550-552, 2013

Médecine

La caféine, nuisible au fœtus

Lors du développement cérébral, certaines cellules nerveuses migrent de leur lieu de naissance à celui où elles fonctionneront plus tard, un processus qui se déroule surtout lors du stade fœtal. L'équipe de Christophe Bernard, de l'INSERM, a montré chez la souris qu'une consommation régulière de caféine par les mères perturbe cette migration, entraînant une sensibilité accrue aux crises d'épilepsie et des déficits cognitifs à long terme.

Les neurobiologistes soulignent que ces résultats ne peuvent pas être extrapolés directement aux humains, dont le cerveau se développe bien moins vite que celui de la souris. Quoi qu'il en soit, le Programme national nutrition santé recommande aux femmes enceintes de ne pas dépasser trois tasses de café par jour.

→ G. J.

C. Silva et al., Science Translational Medicine, en ligne le 7 août 2013

Neurobiologie

Une défense naturelle contre Alzheimer

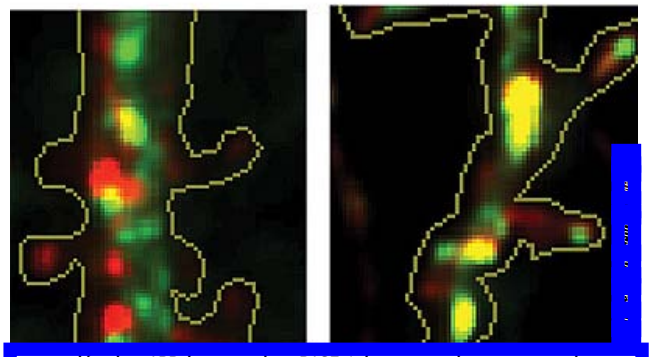
La maladie d'Alzheimer se manifeste notamment par l'agrégation de fragments protéiques, nommés peptides bêta-amyloïdes, autour des neurones. Ces fragments sont découpés dans la protéine APP par l'enzyme BACE-1, toutes deux abondantes dans le cerveau. Pourquoi ne déclenchent-elles pas alors systématiquement la maladie ?

Utpal Das, de l'Université de Californie à San Diego, et ses collègues l'expliquent par la compartimentation de l'APP et de BACE-1, qui les empêcherait d'interagir. Les chercheurs ont cultivé des neurones d'hippocampe (aire cérébrale essentielle à la mémoire, atteinte lors de la maladie d'Alzheimer) de souris. Ils les ont modifiés génétiquement pour qu'ils produisent des molécules APP et BACE-1 fluorescentes, respectivement vertes et rouges. Ils ont alors observé qu'après leur synthèse, elles étaient stockées dans des vésicules séparées.

Ils ont ensuite stimulé l'activité électrique des neurones et constaté que de nombreuses vésicules fusionnaient. Ce processus joue-t-il un rôle dans la maladie ?

→ G. J.

Neuron, en ligne le 7 août 2013



Les molécules APP *(en vert)* et BACE-1 *(en rouge)* sont normalement stockées au sein de vésicules séparées dans les neurones *(à gauche)*. Quand on stimule ces derniers, de nombreuses vésicules fusionnent *(en jaune, à droite)*.

DERNIÈRE minute...

VOIR LES TUMEURS CÉRÉBRALES

Quand un chirurgien opère pour extraire une tumeur du cerveau d'un patient, il lui est difficile de distinguer jusqu'où s'étend le tissu malade. Daniel Orringer et ses collègues, à l'Université du Michigan et à Harvard, ont mis au point une technique d'imagerie qui pourrait l'aider considérablement. Expérimentée sur la souris, la technique est spectroscopique : un laser excite localement le tissu ; le rayonnement que ce dernier émet en réaction, différent selon la nature saine ou non des cellules, est analysé en temps réel ; puis le résultat est traduit par des couleurs.

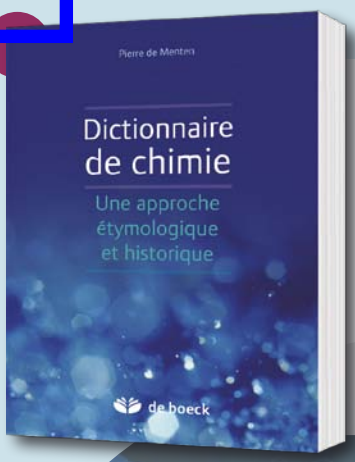
LE VENT INTERSTELLAIRE TOURNE

Le déplacement du Soleil dans le gaz et la poussière du milieu interstellaire crée un vent de matière relatif. Priscilla Frisch, de l'Université de Chicago, et ses collègues ont comparé les données récentes de la sonde spatiale IBEX à des données plus anciennes concernant ce vent interstellaire, en particulier l'hélium neutre qu'il contient. Ce vent semble avoir varié de direction et de vitesse depuis les années 1970. Ainsi, l'environnement du Soleil au sein de la Voie lactée a changé...

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

© Pour la Science - n° 432 - Octobre 2013

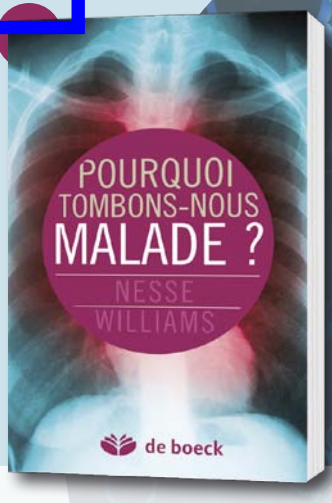
LA RENTRÉE DES SCIENCES



DICTIONNAIRE DE CHIMIE
Une approche étymologique et historique

Pierre de Menten de Horne
Septembre 2013 • 400 p. • 34 €

Un dictionnaire de plus de 1500 entrées, destiné à apporter des compléments étymologiques et historiques aux notions de base en chimie. Il intéressera l'étudiant ou l'enseignant en chimie ou en histoire des sciences ainsi que tout curieux des sciences. Illustrations, synonymes, traduction en allemand et en anglais.



POURQUOI TOMBONS-NOUS MALADE ?
Randolph M. Nesse, George C. Williams
Traduction de Maude Bernardet
Septembre 2013 • 302 p. • 29 €

Savoir comment nos lointains ancêtres ont vécu et ce qu'ils ont affronté nous permet de comprendre les faiblesses de nos corps et nos mécanismes de défenses actuels.

DESSINE-MOI L'UNIVERS
Cédric Millot, Julien Vandermarlière
Septembre 2013 • env. 100 p. • 15 €

Comment les hommes se sont-ils représenté l'Univers à travers les âges? Ce livre expose de façon simple et claire les mécanismes qui ont permis à la pensée scientifique de naître et d'évoluer de l'antiquité à nos jours.

CONCEVOIR ET RÉALISER DES EXPÉRIENCES DE PHYSIQUE
Initiation à la recherche. Application aux TIPE, TPE et MPS.
Projets L1 et L2

François Petitet-Gosgnach
Avril 2013 • 320 p. • 37 €

Cet ouvrage unique présente un grand nombre de matériel et matériaux courants, de système de mesure, d'outillage, **de techniques de confection et de lois physiques** permettant de **concevoir ses propres** expériences dans un simple laboratoire de physique de lycée, voire de collège.

Public : élèves et étudiants scientifiques de bac-2 à bac+2, prépas scientifiques toutes filières, enseignants.

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

de boeck

POINT DE VUE

Refonder une école ambitieuse et diversifiée

Le potentiel des élèves du primaire est fortement sous-exploité en France : telle est la conclusion à laquelle aboutissent les auteurs d'une expérimentation scolaire menée depuis 2006 dans plusieurs dizaines de classes.

Jean-Pierre DEMAILLY

Les résultats de l'école en France sont alarmants. Personne ne le conteste plus, le ministre de l'Éducation lui-même appelant à une « refondation » du système éducatif. Mais cette volonté proclamée restera lettre morte si les causes de la crise scolaire ne sont pas clairement identifiées. Évoquons-en quelques-unes avant de proposer une piste d'amélioration.

Le recul de l'école française a pour origine des réformes mal pensées décidées dans les années 1960 et 1970. Les programmes du primaire ont été allégés sur la base de statistiques faussées concernant les retards scolaires, comme l'a montré la sociologue de l'éducation Nathalie Bulle.

Cet allègement a ébranlé l'édifice éducatif. On a cassé ce qui fonctionnait pour improviser des solutions hasardeuses. En 1970, la réforme des « maths modernes » s'est traduite par un enseignement trop abstrait dans les niveaux élémentaires (même si le contenu proposé pour le lycée était de grande qualité) et a précipité l'affaissement des mathématiques dans l'enseignement primaire. En même temps, les théories pédagogiques de « l'éveil » ont sacrifié l'enseignement raisonné des éléments des sciences, de l'histoire et de la géographie sur l'autel de la « découverte » ; et la commission Rouchette des années 1963-1966 a sacrifié l'enseignement de la grammaire sur l'autel de la « communication ».

La suite est connue et tient d'une fuite en avant nommée « démocratisation » et bientôt renommée « massification ». Les « 80 pour cent d'une classe d'âge au niveau du baccalauréat » du ministre Chevènement en 1985 aboutissent, avec les réformes de 1986, à une réduction des heures de sciences dans les classes scientifiques du lycée. Cette régression sera accentuée par la rénovation pédagogique de l'ère Jospin-Allègre, puis par la réforme Chatel de 2010.

Le corollaire a été un baccalauréat général dévalorisé, ne préparant guère aux études supérieures. L'accès du plus grand nombre à un niveau d'études aussi avancé que possible est à l'évidence un objectif louable. Mais cet objectif exige l'organisation d'un enseignement primaire de haut niveau prolongé par un niveau secondaire diversifié, sans renoncement, quelles que soient les voies offertes, à la culture générale. Malheureusement, les politiques éducatives ont fait l'hypothèse inverse : appauvrissement et déstructuration du primaire, enseignement nivelé par le bas au collège et au lycée général.

LES PROGRAMMES ACTUELS, par leurs incohérences et leurs lacunes, ralentissent l'acquisition des savoirs fondamentaux.

Dans ces conditions, il n'est pas étonnant que le système universitaire français se dégrade. En sciences, la chute drastique des vocations résulte sans doute autant de la mauvaise préparation des étudiants que de leur fuite vers les filières sélectives (IUT, BTS, etc.). Faute de la souplesse que procurerait la possibilité d'orienter les étudiants en fonction de leurs acquis réels, et faute de proposer des enseignements non systématiquement dévalués, on voit mal comment l'université française pourrait se mesurer à ses homologues étrangères.

Pour autant, le déclin scolaire de notre pays n'est pas inéluctable. Notre association, le GRIP (Groupe de réflexion interdisciplinaire sur les programmes), mène depuis 2006 une expérimentation scolaire originale. Soutenue par le ministère de l'Éducation nationale et la Direction générale de l'enseignement scolaire (DGESCO) et intitulée SLECO (Savoir Lire Écrire Compter Calculer), cette expérimentation couvre l'ensemble des niveaux scolaires de la maternelle jusqu'à la fin du primaire.

S'adressant à tous élèves, dans des classes aléatoires souvent situées dans des zones socialement peu favorisées, SLECO se propose de délivrer un enseignement renforcé par rapport aux programmes officiels, pour les mêmes horaires et les mêmes effectifs.

L'idée principale est de s'appuyer sur des progressions scolaires systématiques et des enseignements structurés, en profitant de toutes les synergies possibles entre les contenus enseignés. Par exemple : dessin-écriture-lecture, apprentissage du calcul et résolution constante de problèmes en lien avec le calcul écrit et la rédaction « en français » du raisonnement, apprentissage

de la langue en liaison étroite avec la grammaire, manipulation concrète de grandeurs physiques et calculs quantitatifs en relation avec l'apprentissage d'éléments de science… Les éditions du GRIP diffusent des collections de manuels correspondant à ces programmes enrichis ; plusieurs dizaines de classes pilotes et des milliers d'enseignants ont pu les valider sur le terrain.

Cette expérimentation nous a conduits à la conclusion que le potentiel des élèves, et notamment des plus défavorisés, est aujourd'hui fortement sous-exploité. Les programmes scolaires actuels, par leurs incohérences et leurs lacunes, ralentissent l'acquisition des savoirs fondamentaux, en particulier de l'écriture-lecture, de la langue et des premiers éléments des mathématiques et des sciences.

Nous préconisons donc un renforcement important des contenus de l'école primaire, avec un contrôle régulier des acquis des élèves par les professeurs d'école. Ce suivi ne doit pas exclure *a priori* le redoublement pour la faible proportion d'élèves ayant besoin de davantage de temps ou se trouvant dans l'incapacité de passer dans la classe supérieure.

Le collège unique actuel, qui suscite la frustration des élèves en échec aussi bien qu'un ennui profond des élèves plus rapides, doit faire place à un collège commun diversifié, offrant des voies pratiques exigeantes à côté d'un enseignement général de qualité.

Le lycée, plutôt que les actuelles filières à options qui engendrent un saupoudrage néfaste des savoirs, doit être envisagé avec une organisation dès l'entrée en seconde autour de séries plus typées et plus diversifiées, permettant un enseignement disciplinaire moins dispersé et plus approfondi. L'introduction de disciplines nouvelles comme l'informatique ne peut se faire correctement sans une forte synergie avec l'enseignement des autres disciplines, notamment les mathématiques et les sciences. La prise en compte pragmatique de toutes ces nécessités est à notre sens le grand enjeu des réformes à venir, tout comme l'est à l'évidence la formation des professeurs, aujourd'hui gravement sinistrée.

Jean-Pierre DEMAILLY, mathématicien, est professeur à l'Université Joseph Fourier, à Grenoble, et membre de l'Académie des sciences.

www.boundscience.fr

DÉVELOPPEMENT DURABLE

La biodiversité n'est pas qu'une affaire de points chauds !

Les politiques de conservation de la biodiversité devraient accorder une place plus importante aux zones humanisées, en particulier aux agro-écosystèmes.

Stephanie CARRIERE

Malgré les moyens mis en œuvre depuis plusieurs décennies, l'érosion de la biodiversité se poursuit : par exemple, plus de 20 pour cent des espèces de mammifères et de plantes sont menacées d'extinction. Ce constat doit nous conduire à réexaminer nos politiques de conservation.

La biodiversité est partout : dans les forêts tropicales et les récifs coralliens, où elle est la plus élevée, mais aussi dans les champs, les jardins publics, les villes, les bords d'autoroutes… Pourtant, les zones humanisées sont quasi absentes des politiques de conservation. Les actions se focalisent sur

Un paysage rural *(ici à Madagascar)* préserve mieux la biodiversité s'il est hétérogène, car il autorise alors les flux d'espèces.

les écosystèmes dits primaires (même si, en réalité, ils ont souvent été modifiés par l'homme il y a longtemps). L'une des principales approches consiste à y créer des aires protégées, tels des parcs nationaux. Ces aires couvrent aujourd'hui près du dixième de la surface de la planète et dans la plupart, toute activité économique ou de subsistance est interdite. Les sites sont choisis sur la base de calculs standardisés. Ils sont par exemple souvent implantés sur des « points chauds » de biodiversité, définis en estimant la proportion d'espèces endémiques (qui n'existent qu'à l'endroit considéré) et le pourcentage de l'écosystème ayant disparu. Certaines

espèces sont privilégiées, au détriment de la diversité et sans considération des aspects fonctionnels (l'importance des espèces pour l'écosystème est peu prise en compte). Les modes de gestion de l'environnement des sociétés locales sont aussi ignorés par ces outils standardisés.

De notre point de vue, une nouvelle ère doit donc s'ouvrir. Les politiques de conservation devront se fonder sur des outils diversifiés et accorder aux zones humanisées et aux paysages ruraux une place équivalente à celle des écosystèmes primaires.

Une attention particulière devra être portée aux agro-écosystèmes – des écosystèmes créés par les pratiques agricoles (cultures, élevages, pâturages...) –, qui couvrent 30 pour cent des terres émergées. Les problématiques de la conservation de la biodiversité et de l'alimentation humaine sont en effet liées. D'une part, la première ne peut se faire au détriment de la seconde ; d'autre part, la nature rend des services écosystémiques aux humains, notamment au travers des insectes qui pollinisent les cultures. Plutôt que d'opposer ces deux grands enjeux, il est temps de les mettre en synergie.

La façon dont sont gérés les agro-écosystèmes influe notablement sur la biodiversité. Les paysages ruraux de nombreux pays en développement sont dominés par des étendues agricoles parsemées d'écosystèmes primaires fragmentés, telles des forêts tropicales. Les recherches récentes ont montré que ces zones cultivées autorisent les flux d'animaux et de plantes d'un fragment de forêt à l'autre. En cas d'extinctions locales, des recolonisations peuvent s'effectuer à partir de ces réservoirs interconnectés de biodiversité, garantissant la conservation des espèces à long terme. En revanche, de petites aires protégées entourées de surfaces agricoles immenses et homogènes (caractéristiques des paysages ruraux européens et américains) sont plus vulnérables.

Pour permettre les flux d'espèces, les zones cultivées doivent être spatialement hétérogènes et inclure des arbres isolés, des bosquets, des haies, des jachères...

Les régions tropicales comptent ainsi de nombreuses productions familiales de type agroforestier (où se mélangent des arbres et des plantations de cacao ou de café). Considérées comme peu sauvages et trop archaïques, elles n'intéressent que peu de monde. Il est pourtant capital de les préserver, afin de ne pas reproduire l'erreur faite aux États-Unis et en Europe.

Malheureusement, les approches peu intégratives, telle la création d'aires protégées, restent dominantes dans les pays en développement. Fer de lance des grandes ONG, la conservation des forêts tropicales et la lutte contre la déforestation, très médiatisées, attirent la majorité des financements.

NOUS DEVONS NOUS PLACER dans le cadre d'une nature humanisée, intégrant des zones de conservation, mais aussi des étendues cultivées « écologiques »

En Europe, la situation commence à évoluer. Depuis quelques années, la Politique agricole commune a mis en place une batterie de mesures agro-environnementales. En France, par exemple, une dizaine de dispositifs ont été créés, telle la Prime herbagère agro-environnementale (PHAE) : pour en bénéficier, les agriculteurs doivent notamment installer sur leur exploitation des « éléments de biodiversité » (haies, alignements d'arbres, mares...) à hauteur d'au moins 20 pour cent de la surface engagée.

L'année 2014, décrétée par l'ONU année internationale de l'agriculture familiale, sera l'occasion de mettre en lumière les petites productions traditionnelles. Nous devons nous placer dans le cadre d'une nature humanisée, intégrant des zones de conservation, mais aussi des étendues cultivées « écologiques ». C'est la condition pour éviter une planète dominée par des productions agricoles qui seraient des *no man's land* de biodiversité où surnageraient quelques îlots protégés d'une nature soi-disant vierge. ■

Stéphanie CARRIÈRE est chargée de recherche dans l'Unité Gouvernance, risque, environnement, développement (GRED, UMR 220), à l'IRD.

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° 432 - Octobre 2013

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

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

Disponible sur App Store

DISPONIBLE SUR Google play

lashez ce QR cod
vec votre mobile
u votre tablette
our télécharger
mmédiatement
application.

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

&

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

VRAI OU FAUX

Cadavres : une décomposition ralentie ?

Non. Les conservateurs alimentaires préservent les aliments… mais certainement pas les corps de ceux qui les ont ingérés !

Jean-Pol Beauthier

Un article publié sur Internet a suscité l'émoi de certains internautes. On sait que sur le Web il y a souvent beaucoup de fumée sans feu. Cet article – un canular ? – rapportait que les corps se décomposent moins vite aujourd'hui et citait les conservateurs alimentaires que nous ingérons comme cause potentielle ; un entrepreneur de pompes funèbres de Berlin aurait ainsi déclaré que des corps mis en terre il y a 30 ans semblaient dater d'une semaine. Profitons de cette rumeur pour rappeler comment les corps se décomposent et établir que cette assertion était totalement farfelue.

Après la mort, l'intestin perd son étanchéité du fait de la dégradation de liaisons intercellulaires nommées desmosomes. Les bactéries de la flore intestinale envahissent alors le corps en empruntant le réseau veineux. Elles y consomment le sang et les chairs et rejettent divers gaz et liquides produits par leur métabolisme. Les veines se gonflent et des cloques (les phlyctènes putréfactives) se forment, puis se percent. Ainsi, les chairs liquéfiées retournent à la terre. En outre, diverses réactions biochimiques modifient la composition du corps, dégradant par exemple les acides aminés. La rapidité de ce processus dépend notablement de la température. Dans des conditions usuelles (environ 20 °C), il prend une à deux semaines, peut-être un peu plus quand le corps est enterré.

Les odeurs dégagées par la décomposition attirent des arthropodes, notamment des mouches. Celles-ci pondent leurs œufs sur le cadavre (au sein des orifices naturels, tels le nez et les oreilles, ou des endroits humides, par exemple au creux des aisselles), dont leur progéniture va se nourrir. Les espèces varient selon l'étape de la décomposition, caractérisée par une signature biochimique particulière. Les arthropodes participent ainsi au nettoyage du corps, mais l'action des bactéries endogènes suffit à le décomposer en quelques semaines.

Les perturbations seraient digestives avant d'être posthumes !

Plusieurs facteurs ont été évoqués pour expliquer le soi-disant ralentissement de la décomposition. Certains incriminent l'azote (produit par la décomposition des corps) et les métaux lourds (issus notamment des amalgames dentaires) qui saturaient les sols des cimetières… À l'évidence, il n'en est rien : d'une part, ces produits ne tueraient pas tous les organismes présents dans le sol ; d'autre part, les bactéries endogènes et les œufs d'arthropodes sont, à l'intérieur du cercueil, préservés de leur influence.

La perturbation pourrait-elle venir des bactéries intestinales ? Peut-on imaginer qu'elles mourraient, victimes des conservateurs, ces additifs alimentaires qui préservent nos aliments de l'action des micro-organismes ? À nouveau, non. La flore intestinale comprend 10^{14} bactéries, dix fois plus que l'ensemble des cellules de notre organisme ! Si elle était en partie détruite de notre vivant, nous aurions des perturbations digestives bien plus violentes que celles dont nous sommes parfois victimes.

Reste que des cas de conservation exceptionnelle sont possibles. L'évolution d'un cadavre dépend de nombreux paramètres : température, présence de textiles (sur lesquels peuvent se fixer des moisissures, susceptibles d'accélérer la décomposition), délai entre le décès et l'inhumation (qui conditionne le degré de colonisation du corps par les arthropodes), composition du sol, pratique ou non d'une thanatopraxie (un embaumement, qui peut freiner la pullulation des bactéries pendant plusieurs semaines), qualité du cercueil…

Dans des conditions chaudes et sèches, il arrive que le corps se momifie. La chaleur tue en effet les bactéries endogènes avant qu'elles aient eu le temps de décomposer les chairs. À l'inverse, dans des conditions humides, une transformation dite adipocireuse peut survenir : en présence d'eau, de complexes réactions chimiques entraînent la précipitation des acides gras et figent les graisses. Le corps, qui prend un teint de cire (d'où le nom « adipocireux »), peut alors rester en bon état durant plusieurs siècles. Ce phénomène se produit assez régulièrement, même en Europe. A-t-il inspiré les rumeurs propagées sur Internet ? ■

Jean-Pol BEAUTHIER est médecin légiste et professeur de médecine légale à l'Université libre de Bruxelles.

VIVEZ
une expérience immersive 3D sur Mars, dans la savane et sur la banquise

Sciences au CARRÉ

PLACE CARRÉE
FORUM
DES HALLES
PARIS 1ER

de 12h30
à 19h00

du 17 au 19 octobre 2013

De nombreux scientifiques
expliqueront simplement comment la science contribue à relever les défis sociétaux d'aujourd'hui et de demain.

Des « objets mystères »
à découvrir chaque jour.

De grandes personnalités du monde scientifique
à rencontrer lors de rendez-vous quotidiens.

Des animations
ludo-pédagogiques pour petits et grands.

#SciO2

FÊTE DE LA SCIENCE
du 9 au 13 octobre 2013
www.fetedelascience.fr

brgm · cea · cirad · cnes · cnrs · ifp Energies nouvelles · Ifremer · IGN · INRA · Inria · Inserm · IRD · irstea · METEO FRANCE

AVEC LE SOUTIEN DE : casden · COMMENT ça MARCHE · forum des Halles · MAIRIE DE PARIS · Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche · POUR LA SCIENCE · SCIENCES AVENIR · SCIENCES SUR SEINE · SemParisSeine

ENTRETIEN

Maître et élève : la transmission d'une passion

Nicole Le Douarin évoque son parcours de chercheur avec une de ses élèves, Anne-Hélène Monsoro-Burq.

Baccalauréat de lettres en 1945. Baccalauréat de philosophie en 1946. Baccalauréat de sciences expérimentales avec mention bien. Hypokhâgne. Agrégation de sciences naturelles en 1954. Ces quelques jalons illustrent une caractéristique de Nicole Le Douarin : sa curiosité et son appétit de savoir. Devenue professeur au Collège de France, membre de l'Académie des sciences, médaille d'or du CNRS, Nicole Le Douarin a contribué aux avancées scientifiques du XX^{e} siècle. Mais au-delà de son travail de recherche, elle a su transmettre à ses élèves sa passion pour la science, sa rigueur, son enthousiasme, comme en témoigne Anne-Hélène Monsoro-Burq, professeur à l'Université Paris-Sud, qui dirige l'équipe Signalisation et développement de la crête neurale de l'Institut Curie, à Orsay.

POUR LA SCIENCE

Aujourd'hui les lycéens doivent choisir très tôt leur orientation. Les passerelles entre disciplines ne sont ni fréquentes ni aisées à franchir. Votre parcours n'est-il pas une preuve que toutes les portes doivent rester ouvertes aussi longtemps que possible ?

NICOLE LE DOUARIN : Effectivement, quand j'étais au lycée, il était possible, bien que peu fréquent, de passer un baccalauréat de lettres classiques et un autre de sciences. Il n'était pas rare d'étudier ses « humanités », le français, le grec et le latin, à côté des mathématiques et des sciences naturelles, que l'on nomme aujourd'hui sciences de la vie et de la Terre.

Mais finalement, j'ai décidé de devenir professeur de sciences naturelles. J'ai passé l'agrégation en 1954. Comme je le raconte dans le livre que j'ai publié en 2012, munie du CAPES et de l'agrégation, j'ai dû quitter Paris avec mon mari et notre fille pour aller enseigner à Caen dans un lycée de garçons (*Dans le Secret des Êtres Vivants – Itinéraire d'une biologiste*, Robert Laffont). Enseigner pendant trois ans en province était alors un « purgatoire » obligatoire pour les jeunes agrégés qui désiraient faire leur carrière dans la capitale.

Pour la première fois – je ne savais pas alors que ce ne serait pas la dernière –, j'ai été confrontée à la misogynie : mon mari avait les mêmes diplômes que moi. À lui les classes de terminales, à moi celles de la sixième à la troisième. Mais faire cours à de jeunes élèves *a priori* peu intéressés par les sciences naturelles oblige à faire preuve d'inventivité et de clarté. Je cherchais à faire participer les élèves, en leur proposant, par exemple, de trouver des illustrations sur le sujet des cours. Les murs étaient couverts de ces contributions des élèves. Ces méthodes, alors peu classiques, furent remarquées par l'inspecteur général qui me proposa un poste dans le lycée expérimental de Montgeron, dans la banlieue de Paris.

PLS

Quelles étaient les méthodes appliquées dans ce lycée ?

NICOLE LE DOUARIN : Elles étaient très innovantes et intéressantes. Par exemple, un même professeur enseignait plusieurs disciplines scientifiques. Il en était de même pour les lettres. Ainsi, nous pouvions suivre les mêmes élèves et les mêmes classes pendant plusieurs heures par semaine et même, dans certains cas, pendant plusieurs années. Dans ce lycée, nous pouvions innover dans le domaine de la pédagogie, et l'enseignement était très concret. Élèves et enseignants étaient satisfaits, je crois.

PLS

Cela rappelle un peu les méthodes que propose l'association *La main à la pâte*. Mais comment passe-t-on du statut de professeur de sciences naturelles à celui de chercheur ?

NICOLE LE DOUARIN : À Montgeron, j'avais 27 ans et deux petites filles. J'aimais mon métier, mais quand j'ai eu l'impression de le faire correctement, j'ai voulu… en changer. Pour avancer, surmonter de nouvelles difficultés. Ayant fait de la zoologie, de la botanique, de la géologie et de la physiologie pour passer mon agrégation, j'ai voulu suivre des cours de chimie biologique pendant le temps libre que me laissait le lycée. J'ai demandé l'autorisation de rattraper les cours que mes propres enseignements m'empêcheraient de suivre. Il me fut répondu que j'avais déjà un métier, un mari et des enfants, que c'était bien suffisant et que je n'avais pas besoin de faire d'autres études… La possibilité de faire une

hèse m'a également été refusée, car j'étais trop âgée. Heureusement, le hasard a voulu que je rencontre une amie que je n'avais pas revue depuis longtemps. Elle faisait de la recherche dans le laboratoire de biologie expérimentale dirigé par Étienne Wolff, titulaire de la chaire d'embryologie et de tératologie expérimentales du Collège de France. Le hasard, la sollicitude de mon amie, la rencontre avec Étienne Wolff : ce fut le début de ma carrière dans la recherche.

PLS

C'est ainsi qu'ont commencé vos travaux en embryologie ?

→ NICOLE LE DOUARIN : Je commençais donc, sous la direction d'Étienne Wolff, une thèse sur le développement de l'appareil digestif et des glandes qui lui sont associées. Au cours de cette thèse, où tout était à découvrir, le terrain étant quasi vierge, j'ai pu mettre en évidence les mouvements des cellules destinées à former l'appareil digestif, et j'ai travaillé à la fois *in vivo*, sur des poulets, et *in vitro*, sur des cultures de cellules, deux aspects qui ont été importants pour la suite de mes travaux. Les travaux réalisés sous la direction d'Étienne Wolff ont contribué à l'essor de la biologie du développement. Les cinq années que j'ai passées dans son laboratoire ont été décisives pour moi. Il m'a enseigné la rigueur, la nécessité de replacer chaque expérience dans un contexte plus général, de poser les bonnes questions,

PLS

Nicole Le Douarin fut votre directrice de thèse, puis a dirigé vos recherches. Vous a-t-elle transmis ces valeurs que son propre directeur lui avait enseignées ?

→ ANNE-HELENE MONSORO-BURQ : Bien sûr. J'y ajouterais la passion intérieure : on est face à une énigme et on ressent l'impérieuse nécessité de la résoudre. On apprend à se poser les bonnes questions, à les poser à son maître pour progresser, mais aussi à s'approprier les questions qu'il pose. Tout cela n'est pas immédiat. Il y a un temps de maturation, l'attitude de l'élève progresse au contact du patron de thèse. La passion s'apprend. C'est ce qui m'est arrivé. J'ai postulé pour faire ma thèse dans l'équipe de Nicole Le Douarin,

car je voulais étudier la migration des cellules et les signaux moléculaires qui commandent cette migration. Et je dois dire que ma motivation, ma passion pour la recherche n'ont fait que croître au cours de ma thèse !

PLS

Anne-Hélène Monsoro-Burq a été l'une de vos nombreuses élèves. Pensez-vous que le Laboratoire de Nogent-sur-Marne que vous avez dirigé représentait une sorte de havre où la misogynie n'avait pas cours ?

→ NICOLE LE DOUARIN : Je voudrais vous raconter encore une anecdote à propos du point que vous soulevez. Quelques années avant son départ à la retraite, Étienne Wolff me fit part de son intention de trouver son successeur. Il me dit que j'étais la meilleure de ses élèves, mais qu'il ne pouvait pas me proposer pour un poste au Collège de France, car cette « vénérable » institution n'avait jamais élu de femme et qu'il ne voulait pas rompre cette tradition. Je tiens à souligner que je n'avais jamais songé à lui succéder à ce poste si prestigieux, et que ses propos m'avaient beaucoup surprise à l'époque.

Cela reflétait l'opinion générale des élites sur la place des femmes dans la société. S'il m'avait apporté un soutien sans faille dans le début de ma carrière de chercheur, l'objectif de me faire ouvrir les portes du Collège de France lui semblait un combat perdu d'avance. Rappelons que nous étions à la fin des années 1960. La première femme à être élue professeur au Collège de France fut Jacqueline de Romilly, en 1973.

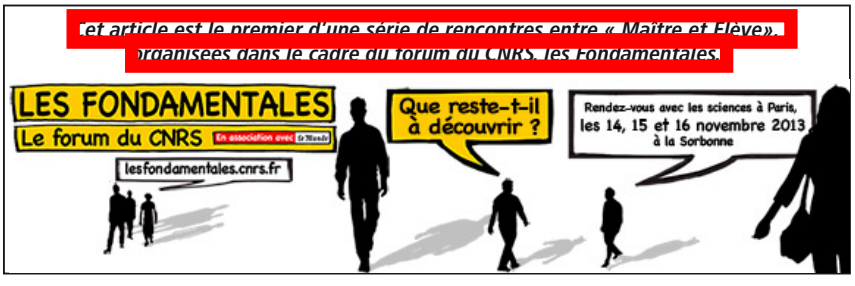
Quoi qu'il en soit, la succession d'Étienne Wolff au poste de directeur de l'Institut d'embryologie et de tératologie du Collège de France, à Nogent, posa des difficultés, au point que l'Institut est même resté sans direction pendant

plusieurs mois. Par une suite de contacts pris par l'administration du CNRS auprès de nombreux chercheurs, y compris aux États-Unis, où mes travaux étaient alors peut-être plus connus qu'en France, mon nom a été proposé. Diriger l'Institut tout en continuant mes recherches… Un nouveau défi ! Il s'agissait, comme souvent dans ma carrière, de m'impliquer dans une entreprise à la fois commune et personnelle.

→ ANNE-HELENE MONSORO-BURQ : Nicole Le Douarin omet de mentionner qu'elle a joué un autre rôle, tout aussi essentiel, celui de « mentor » de tous les élèves qu'elle a encadrés. Au fil des discussions que nous avions avec elle, j'ai constaté que notre raisonnement devenait plus rigoureux, plus juste aussi. Quand nous avions un doute ou une question, elle y répondait, tant est vaste le champ de ses connaissances. Par son expérience, le mentor permet à l'élève de s'approprier plus efficacement les connaissances qui lui sont nécessaires. C'est aussi un modèle, quand on devient soi-même responsable de jeunes chercheurs et d'un laboratoire. Même si, bien sûr, chacun adapte ce modèle à sa propre personnalité.

→ NICOLE LE DOUARIN : Mes élèves m'ont eux-mêmes beaucoup transmis. J'entretiens des relations souvent chaleureuses avec mes anciens élèves et suis très fière de la réussite de plusieurs d'entre eux. Au plan professionnel, l'affinité intellectuelle, la confiance réciproque nous ont permis de progresser dans la compréhension du développement embryonnaire. Les chimères, à la fois caille et poulet, nous ont été très utiles, car ces organismes portent des cellules des deux espèces qui ont des aspects différents ; on peut donc suivre la progression du système nerveux central et des autres tissus qui se mettent en place au cours de l'embryogenèse. ■

Cet article est le premier d'une série de rencontres entre « Maître et Élève », organisées dans le cadre du forum du CNRS, les Fondamentales.



L'élagage des connexions pendant le sommeil

Pendant le sommeil, des connexions entre cellules nerveuses seraient plus ou moins affaiblies. Ainsi, les souvenirs sans importance seraient oubliés, ce qui favoriserait l'apprentissage. De surcroît, le cerveau économiserait de l'énergie.

Giulio Tononi et Chiara Cirelli

Chaque nuit, lorsque le sommeil nous rend aveugles, muets et quasi paralysés, notre cerveau travaille. Les neurones s'activent presque aussi souvent qu'en état de veille, pour une consommation d'énergie élevée. À quoi sert cette activité pendant un moment de supposé repos ?

Elle remplit probablement une fonction essentielle. Le premier élément qui le suggère est l'omniprésence du sommeil. Tous les animaux semblent dormir, malgré une vulnérabilité accrue face aux prédateurs. Les oiseaux, abeilles, iguanes et cafards dorment – de même que les drosophiles, comme nous l'avons montré avec d'autres chercheurs il y a plus de dix ans. L'évolution a entraîné des adaptations extraordinaires pour l'autoriser : ainsi, les dauphins et certains autres mammifères marins, qui doivent souvent remonter à la surface pour respirer, dorment « d'un hémisphère cérébral », pendant que l'autre reste éveillé.

Quelle est donc cette fonction du sommeil qui le rend si essentiel ? Quand nous sommes éveillés, des informations sont enregistrées dans notre cerveau sous la forme de modifications des connexions entre neurones. Il y a plus de 20 ans, nous avons supposé que lorsque nous dormons, les milliards de connexions neuronales modifiées pendant l'éveil précédent s'affaiblissent – plus ou moins selon l'importance des souvenirs codés – et reviennent à un « état de base ». En conséquence, le sommeil permettrait d'enregistrer de nouveaux souvenirs tout au long de la vie sans que les réseaux cérébraux ne soient saturés ou ne détruisent des souvenirs anciens.

L'ESSENTIEL

- Le sommeil doit avoir une fonction vitale, car il existe chez tous les animaux.
- Alors qu'on considère classiquement qu'il renforce les connexions neuronales codant les souvenirs, il pourrait en réalité les affaiblir. Les connexions impliquées dans les souvenirs importants seraient moins affaiblies que les autres.
- De cette façon, le sommeil préserverait les circuits cérébraux d'une saturation par les expériences quotidiennes et d'une consommation excessive d'énergie.

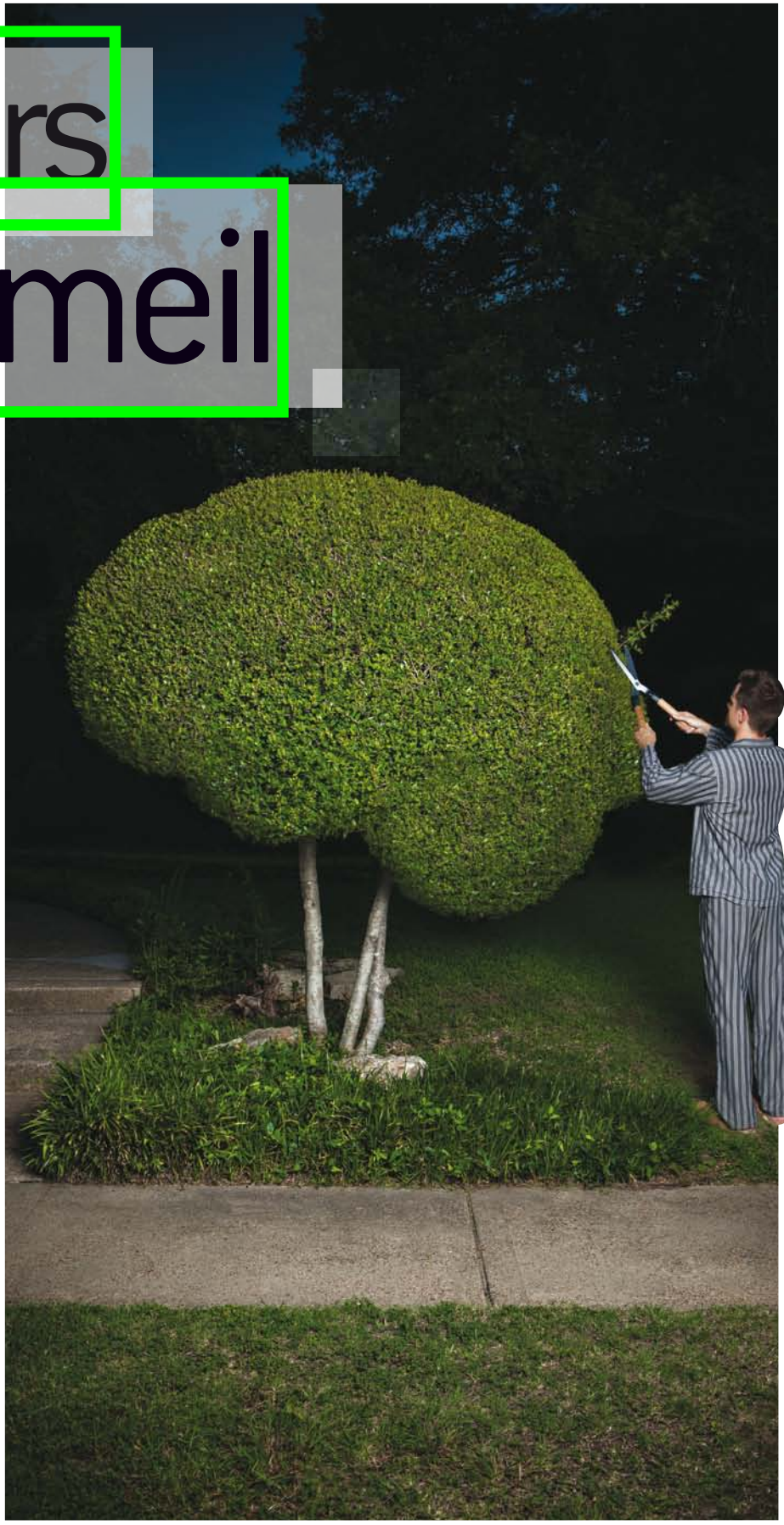
Une hypothèse controversée

Notre hypothèse va à l'encontre de celle de beaucoup de neurobiologistes. Certains soutiennent que la mémorisation durable est permise par le renforcement, lors du sommeil, des synapses (les zones de jonction entre les neurones) impliquées dans les souvenirs acquis récemment. Nous pensons que c'est l'affaiblissement des synapses associées aux souvenirs inutiles qui est à l'œuvre.

L'idée que le sommeil est important pour la mémoire remonte à près d'un siècle. Depuis, de nombreuses expériences ont montré qu'après une nuit de sommeil, voire juste un petit somme, les souvenirs

© Pour la Science - n° 432 - Octobre 2013

souvenirs le sommeil



nouvellement formés sont mieux ancrés qu'après un temps d'éveil identique. Cela vaut pour la mémoire déclarative, qui enregistre, par exemple, des listes de mots, ainsi que pour les mémoires perceptive et procédurale, où sont stockés les savoir-faire, tels que jouer d'un instrument de musique.

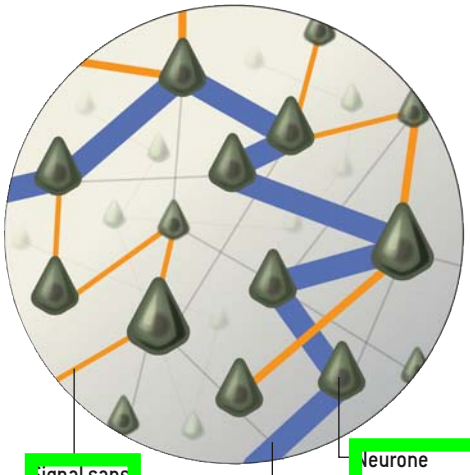
Les neurobiologistes ont alors cherché comment le cerveau traite ces souvenirs récents lors du sommeil. Au cours des 20 dernières années, des études menées chez les rongeurs et chez l'homme ont révélé une similitude de certains schémas d'activité neuronale pendant le sommeil et pendant l'éveil. Par exemple, quand un rat apprend à parcourir un labyrinthe, des neurones d'une aire cérébrale nommée hippocampe sont activés selon des séquences spécifiques. Lors du sommeil qui s'ensuit, ces séquences sont réactivées trop souvent pour que ce soit le fruit d'une activité cérébrale aléatoire ; en d'autres termes, le cerveau rejoue les scènes vécues pendant l'éveil.

Dès lors, de nombreux chercheurs ont supposé que le sommeil consolide les souvenirs en renforçant les synapses activées lors de l'enregistrement de l'information chez le sujet éveillé. L'idée est que, lorsque des neurones connectés s'activent

Lorsque nous sommes éveillés, des souvenirs se forment quand des neurones sont activés quasi simultanément, ce qui renforce leurs liaisons *(ci-dessous, à gauche)*. Les neurobiologistes ont émis l'hypothèse que pendant le sommeil, la réactivation de ces circuits neuronaux renforce encore plus ces liaisons. C'est pourtant l'inverse qui se produirait *(à droite)* : une activation spontanée durant le sommeil affaiblirait les synapses (les zones de contact entre les neurones) de nombreux circuits. Selon les auteurs, cet affaiblissement ramènerait les synapses à leur niveau initial, ce qui économiserait de l'énergie et réduirait les contraintes sur les cellules nerveuses. Ce retour à un niveau de base, nommé homéostasie, représenterait la fonction première du sommeil.

En état d'éveil
Les circuits neuronaux s'activent en réponse à une stimulation environnementale, qu'elle soit digne d'intérêt *(en bleu)* ou non *(en orange)*. Cette activation renforce les synapses connectant les neurones *(en vert)*.

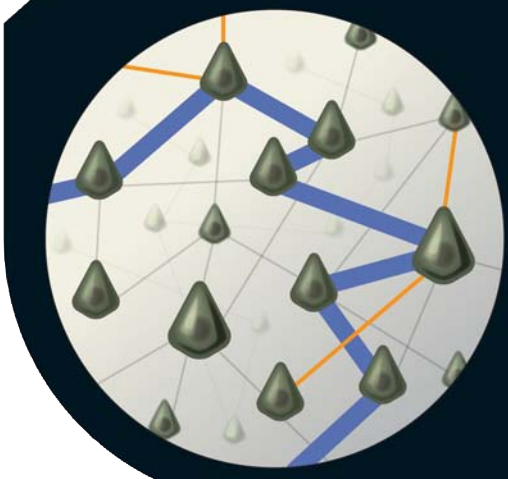
Pendant le sommeil
L'activation spontanée supprime ou affaiblit sélectivement des liaisons neuronales *(ci-dessous ; l'épaisseur des traits est caractéristique de la force des liaisons)*. Celles qui sont sans intérêt sont plus affaiblies que les autres, ce qui permet aux souvenirs importants



Signal sans intérêt

Neurone

Signal à retenir



de façon répétée et quasi simultanée, les synapses transmettent de mieux en mieux les signaux. Ce renforcement sélectif, nommé potentialisation synaptique, serait le principal mécanisme cérébral de l'apprentissage. Un souvenir serait ainsi encodé dans les réseaux neuronaux par un ensemble de connexions renforcées – qui se renforceraient encore plus lorsque nous dormons.

Le renforcement jamais prouvé pendant le sommeil

Lors de l'éveil, le cerveau rejoue aussi les souvenirs, et le fait que cela renforce les synapses concernées est bien établi. En revanche, un tel renforcement pendant le sommeil n'a jamais été mis en évidence. Nous n'en sommes par surpris, car selon nous, les connexions neuronales sont affaiblies – et non renforcées – par l'activité cérébrale du dormeur (celle qui rejoue les souvenirs comme celle qui semble aléatoire).

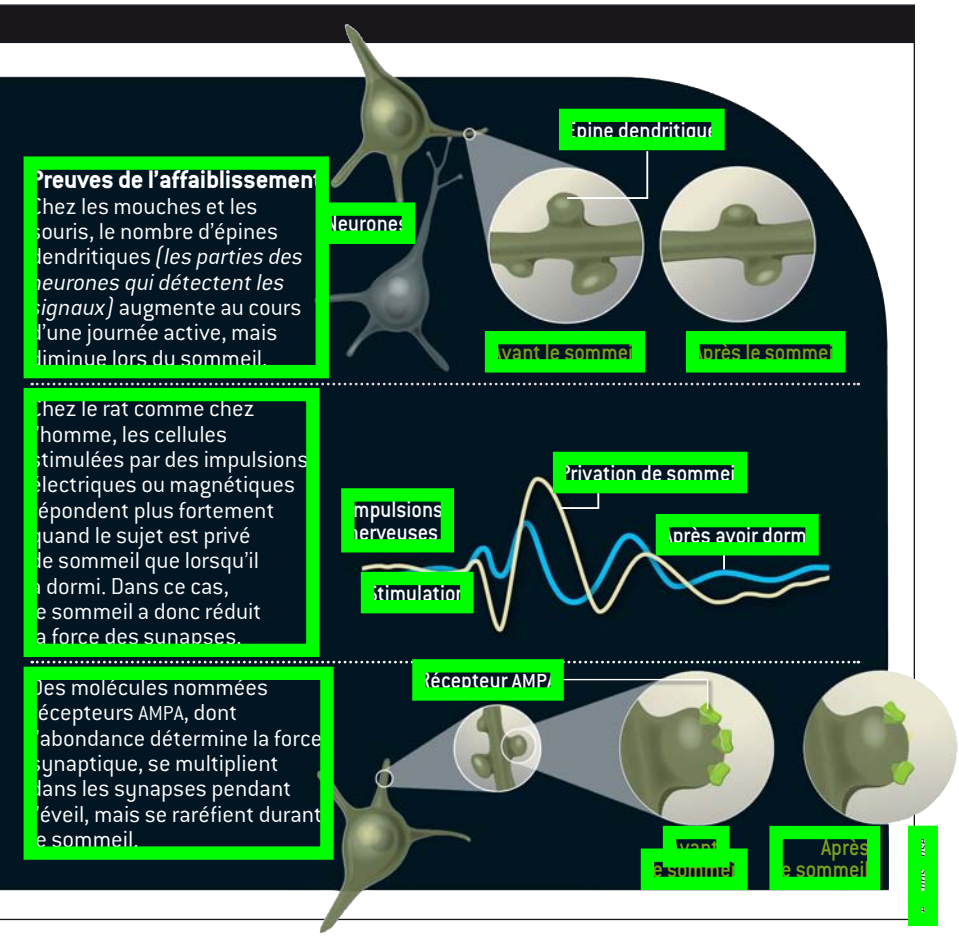
De multiples raisons indiquent qu'un fonctionnement correct du cerveau nécessite cet affaiblissement. D'abord, plus les synapses sont fortes, plus elles consomment d'énergie, et le cerveau ne dispose pas de réserves illimitées. Chez l'homme, il accapare environ 20 pour cent de la consommation énergétique de l'organisme, ce qui en fait l'organe le plus gourmand par unité de poids. Au moins les deux tiers de cette consommation alimentent l'activité synaptique. En outre, la construction et le renforcement de synapses sont exigeants pour les cellules, qui doivent fabriquer de multiples composants, tels des mitochondries (les centrales énergétiques des cellules), des vésicules synaptiques (qui transportent des molécules de signalisation) et différents types de protéines et de lipides nécessaires à la communication à travers les synapses.

En raison des contraintes sur les ressources, le cerveau ne peut continuer à renforcer les synapses jour et nuit pendant toute une vie. Nous ne doutons pas du rôle de la potentialisation dans l'apprentissage, mais juste du fait qu'elle se poursuive pendant le sommeil. Au contraire, un affaiblissement synaptique ramènerait les circuits cérébraux à un niveau de renforcement et d'efficacité plus économe en énergie et moins exigeant pour les cellules. Nous avons nommé homéostasie synaptique cette hypothèse d'une restauration de l'état de base par le sommeil, qui rendrait au cerveau sa capacité d'apprentissage et d'adaptation lors des phases d'éveil ultérieures. Le prix à payer pour ce rétalonnage neuronal serait la déconnexion temporaire de l'environnement externe.

Les souvenirs triés

Reste à expliquer la façon dont le sommeil favorise l'apprentissage et la mémoire. Comment des synapses affaiblies peuvent-elles mieux enregistrer les compétences et les événements ? Pendant la journée, presque tout ce que l'on vit laisse une trace neuronale dans le cerveau et les événements importants, tels qu'une rencontre ou l'apprentissage d'un morceau de musique, ne représentent qu'une partie insignifiante

© Pour la Science - n° 432 - Octobre 2013



de cet encodage neuronal. Pour améliorer la mémorisation, le cerveau endormi doit faire la distinction entre le bruit de fond (les informations sans intérêt) et le signal (les événements importants).

Nous pensons que lors du sommeil, l'activation spontanée de multiples circuits neuronaux concerne aussi bien les souvenirs formés dans la journée que des réseaux de souvenirs plus anciens. Ils sont alors combinés de façon variée (les rêves donnent un aperçu de cette mêlée neuronale). Cela permet au cerveau de tester quels nouveaux éléments s'associent aux souvenirs stockés, dont l'importance est avérée, et d'affaiblir les synapses qui s'intègrent mal dans le grand schéma de la mémoire.

Ce défilé de scénarios imaginaires serait perturbé par la conscience de l'environnement ou par nos actions ; il est donc préférable que nous dormions pendant son déroulement. De même, la restauration de l'homéostasie synaptique ne doit pas avoir lieu pendant l'éveil, car les événements de la journée domineraient le processus, mettant en relief les données les plus récentes et non les plus importantes. La déconnexion profonde du cerveau endormi le libère de la tyrannie du présent et crée des conditions idéales pour intégrer et consolider les souvenirs.

L'idée que le sommeil affaiblit les synapses – et ne les renforce pas – est étayée par des données électroencéphalographiques. Il s'agit d'enregistrements des courants électriques à la surface du crâne, qui traduisent l'activité du cortex cérébral, à l'aide d'électrodes fixées sur le cuir chevelu. Le tracé résultant est nommé électroencéphalogramme.

Il y a plusieurs décennies, des mesures réalisées sur des sujets endormis ont révélé deux types principaux de sommeil : le sommeil paradoxal (aussi nommé sommeil REM, pour *Rapid eye movement* ou mouvements oculaires rapides, car les yeux bougent rapidement pendant cette phase), et le sommeil lent (dit non-REM). Le sommeil REM a été découvert par le neurobiologiste français Michel Jouvet en 1959. Ces deux types de sommeil alternent au fil de la nuit et chacun présente une activité cérébrale spécifique. L'électroencéphalogramme du sommeil REM est dominé par des oscillations assez rapides, qui ressemblent à celles enregistrées durant l'état de veille, tandis que le sommeil non-REM se caractérise par des oscillations lentes, à des fréquences d'environ un cycle par seconde. Il y a dix ans, Mircea Steriade (1924-2006), de l'Université Laval, au Québec, a découvert que les ondes lentes du sommeil non-REM résultent de l'activité coordonnée de groupes de neurones qui s'activent et s'éteignent de façon simultanée.

Par la suite, on a montré, chez les oiseaux et les mammifères, que l'amplitude de ces ondes est grande juste après une longue période d'éveil et diminue au fil de la nuit. L'hypothèse d'un affaiblissement des synapses pendant le sommeil permettrait de l'expliquer. En effet, si les synapses sont fortes, les neurones synchronisent davantage leur activation, créant ainsi des ondes lentes de plus grande amplitude. C'est ce qui se produirait au début de la nuit, car des synapses ont été renforcées au cours de l'état d'éveil antérieur. Leur affaiblissement conduirait à une baisse de la synchronisation, et donc de l'amplitude des ondes lentes. Des simulations sur ordinateur et des expériences réalisées chez l'homme et l'animal semblent l'indiquer.

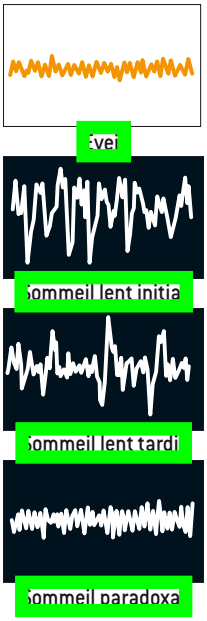
Des preuves d'un affaiblissement des synapses

Des preuves directes de l'affaiblissement des synapses – qui peut aller jusqu'à leur neutralisation – pendant le sommeil ont été obtenues chez l'animal. Chez la drosophile, par exemple, le nombre et la taille des synapses augmentent progressivement pendant le jour, en particulier lorsque l'insecte est dans un environnement stimulant, et le processus s'inverse durant le sommeil. Ainsi, quand des drosophiles passent la journée à interagir, les neurones présentent davantage d'épines dendritiques – de minuscules excroissances neuronales sur lesquelles se trouvent la plupart des synapses – le soir que le matin. Et le nombre d'épines revient à sa valeur initiale pendant la nuit si, et seulement si, les mouches peuvent dormir.

Nous avons observé un phénomène similaire dans le cortex cérébral de souris

Une amplitude qui diminue

Des enregistrements de l'activité électrique dans le cerveau montrent que les ondes cérébrales se modifient au cours de la nuit. Le dormeur alterne entre une phase de sommeil paradoxal (dit REM pour *Rapid-eye movements*, ou mouvements oculaires rapides) et de sommeil lent (dit non-REM ou NREM) *(ci-dessous)*. L'amplitude moyenne des ondes du sommeil lent diminue au cours de la nuit, ce qui suggère que les synapses participant à ces ondes s'affaiblissent. Selon les auteurs, l'affaiblissement pourrait se produire pendant le sommeil lent et résulter d'une baisse notable de la concentration de certains composés chimiques nécessaires au renforcement des synapses activées.



adolescentes : le nombre d'épines dendritiques augmente lorsque les animaux sont éveillés et baisse quand ils dorment. Chez les rongeurs adultes, ce n'est pas le nombre d'épines qui change, mais l'abondance de certaines molécules synaptiques, nommées récepteurs AMPA, qui déterminent la force des synapses : plus ces molécules abondent, plus la synapse est renforcée. Or, le nombre de récepteurs AMPA par synapse augmente après l'éveil et décroît après l'endormissement.

La force des synapses peut être évaluée directement en stimulant les fibres nerveuses du cortex grâce à une électrode. Les neurones y répondent par une décharge électrique, d'autant plus intense que les synapses sont fortes. Nous avons montré chez le rat que l'intensité de cette décharge est élevée après quelques heures d'éveil et faible après un somme. Marcello Massimini, de l'Université de Milan, et Reto Huber, de l'Université de Zurich, ont réalisé une expérience voisine chez l'homme. À la place d'une sonde électrique, ils ont utilisé une stimulation magnétique transcrânienne (une impulsion magnétique appliquée sur le crâne) pour stimuler les neurones. Ils ont ensuite enregistré l'intensité des réponses corticales par des techniques d'électroencéphalographie. Plus un sujet était resté éveillé longtemps, plus les réponses étaient intenses, et elles revenaient à leur niveau de base après une nuit de sommeil.

Les nouveaux mots mieux mémorisés s'ils sont dans une langue connue

Pendant le sommeil, l'activité corticale spontanée semble donc affaiblir, voire supprimer, les connexions synaptiques. Ce processus assurerait la survie des circuits neuronaux « les plus adaptés ». Il s'agit, d'une part, de ceux qui ont été activés de façon intense et régulière pendant l'éveil, par exemple lors d'un apprentissage, et, d'autre part, de ceux qui codent les souvenirs s'intégrant le mieux avec les souvenirs plus anciens : un nouveau mot serait ainsi mieux mémorisé s'il appartient à une langue connue. En revanche, les synapses peu renforcées pendant l'éveil (correspondant, par exemple, aux notes produites à tâtons sur une guitare) ou qui codent une information moins proche des autres souvenirs (tel un nouveau mot dans une langue inconnue) seraient les plus affaiblies.

Grâce à cette sélection, les événements sans intérêt ne laisseraient pas de traces durables dans les circuits neuronaux, tandis que les souvenirs importants seraient préservés. En outre, l'affaiblissement rendrait les synapses plus aptes à un nouveau cycle de renforcement pendant l'éveil ultérieur. De fait, plusieurs études ont montré qu'après une nuit de sommeil, l'apprentissage est bien plus efficace qu'après une longue période d'éveil – pour les étudiants, c'est une information... à mémoriser !

Avec d'autres neurobiologistes, nous avons cherché à déterminer quels mécanismes affaiblissent les synapses qui encodent le « bruit de fond » tout en préservant celles qui correspondent au « signal ». Bien que nous n'y soyons pas encore parvenus, nous avons plusieurs pistes. Chez les mammifères, les ondes lentes du sommeil non-REM pourraient jouer un rôle. En effet, lors d'études sur du tissu cérébral de rat, les cellules nerveuses transmettaient moins efficacement les signaux après avoir été stimulées selon des cycles d'activation et d'inactivation imitant ceux des ondes lentes.

Des changements chimiques dans le cerveau endormi pourraient aussi conduire à l'affaiblissement synaptique. Les neurones baignent dans une soupe de composés chimiques, les neurotransmetteurs, qui influent sur la transmission synaptique : acétylcholine, noradrénaline, dopamine, sérotonine, histamine, hypocrétine... Chez le sujet éveillé, ils sont en concentration élevée et favorisent le renforcement de certaines synapses, *via* diverses cascades de réactions biochimiques, quand les circuits neuronaux s'activent. Mais pendant le sommeil, en particulier le sommeil non-REM, ils sont moins concentrés, ce qui pourrait entraîner l'affaiblissement des synapses plutôt que leur renforcement. De même, un composé nommé facteur neurotrophique dérivé du cerveau ou BDNF *(Brain-derived neurotrophic factor)*, connu pour favoriser le renforcement synaptique et la mémorisation, pourrait avoir une action opposée sur les synapses quand il est en faible concentration. Or c'est le cas pendant le sommeil.

Quoi qu'il en soit, on a montré chez plusieurs espèces que la force synaptique globale augmente pendant l'éveil et diminue durant le sommeil. Cela corrobore

© Pour la Science - n° 432 - Octobre 2013

Communiquer la science par le débat

Regards croisés entre producteurs

Vendredi 18 octobre 2013
de 9 heures à 17 heures 30
Institut Pasteur
Centre d'Information Scientifique (CIS)
28, rue du Dr Roux – Paris 15e

Notez la date du colloque - 18 octobre 2013

La quatrième édition des colloques « Communiquer la science » sera consacrée au débat dans son acception la plus large : de l'échange entre scientifiques et citoyens, lors d'une fête de la science ou d'un café des sciences, au débat public plus formalisé. L'objectif de cette rencontre : susciter une réflexion permettant aux organismes de recherche de mieux dialoguer avec les publics et aux citoyens d'appréhender les enjeux des recherches pour devenir acteurs du débat.

Le colloque s'adresse aux institutions de recherche, aux associations, aux élus, aux médias, aux citoyens qui pourront, aussi, participer via Twitter : #ConnectScience

Partage et mise en commun des pratiques, discussion sur les différentes formes de débats et leur finalité …, tels sont les enjeux de cette rencontre.

Au programme

- Comment mettre en débat les questions vives de la science et leur impact sur la société ? Comment permettre l'implication de tous et éclairer les choix sociétaux ? Débattre s'apprend-il ? Informer objectivement, est-ce possible ?
- Les scientifiques doivent-ils se former au débat ? Quelle place pour les experts dans le débat ? Où sont les limites entre préconisation scientifique et arbitrage politique ?
- Quand débattre des orientations de la recherche ? Faut-il ouvrir le débat à tous les domaines de la recherche ? Pourquoi les institutions de recherche organisent-elles des débats, pour informer les citoyens, recueillir leur avis, ou faciliter l'acceptabilité ?
- Quels rôles pour les élus, les décideurs, la presse, les médias, les associations et les lobbies dans le débat ?

Avec la participation de **Brice Laurent** (Mines ParisTech), **Nicole Chémali** (Genopole®), **Hervé Chneiweiss** (CNRS), **Alice René** (CCNE), **Marie-Christine Blandin** (sénatrice), **Loïc Blondiaux** (GIS « participation du public, décision, démocratie participative »)

Des études de cas et des ateliers

Apprendre à tous à débattre ; le rôle des facilitateurs ; les débats sur les recherches émergentes …. Forces et faiblesses de quelques exemples significatifs émanant de l'IRD « parcours migratoires », du CEA « CEASPHERE», de l'Ineris « Picaso », de l'Irstea « controverses environnementales », de l'Observatoire de la biologie de synthèse, de l'Andra « Cigeo », du Genopole® « cafés du gène », de l'Inserm « santé en questions », de l'association L'arbre des connaissances « jouer à débattre », d'Universcience « fin de la faim ».

Table ronde

Comment faire dialoguer ensemble scientifiques, citoyens et politiques ? Individuellement ? Via les associations ? Quels enseignements tirer des expériences passées ? Comment faire en sorte que le débat facilite la compréhension de la science et des enjeux de la recherche ?

Table ronde avec Michel Alberganti (France Culture), **Michel Alberganti** (France Culture), **Michel Callon** (Ecole des mines de Paris), **Dominique Donnet-Kamel** (Inserm), **Etienne Klein** (CEA)

Inscrivez-vous dès maintenant

www.communication-publique.fr/inscription-18-octobre-2013

Entrée libre sous réserve d'inscription préalable et dans la limite des places disponibles

Communication PUBLIQUE

Placé sous l'égide de Communication publique, association de responsables de communication des institutions publiques, ce colloque est organisé à l'initiative d'organismes de recherche : Andra, BRGM, CEA, CNRS, Genopole®, Ineris, Inserm, Institut Pasteur, IRD, Irstea, de l'IHEST, du MESR, d'Universcience et avec le concours de la CASDEN et la participation de Pour La Science.

Des observations compatibles avec la théorie classique

Selon la théorie de Giulio Tononi et Chiara Cirelli, le cerveau procéderait au « nettoyage » des connexions les moins pertinentes pendant le sommeil et stabiliserait celles qui correspondent aux informations importantes à conserver. Leurs arguments sont assez convaincants et leur idée séduisante, car elle permettrait d'éviter une augmentation constante de l'activité des réseaux suite à l'accumulation d'informations à mémoriser.

Cependant, leur théorie présente certaines faiblesses. D'une part, leurs observations montrent une diminution globale de la force des synapses, mais rien ne prouve que celles qui codent les souvenirs importants sont préservées. Avec les techniques actuelles, il est impossible de déterminer si la baisse d'intensité de la réponse neuronale à une stimulation et les modifications physiologiques qui l'accompagnent (raréfaction des épines dendritiques et des récepteurs AMPA), constatées après le sommeil, se limitent à certaines connexions. D'autre part, les liens entre l'affaiblissement synaptique et les réactivations neuronales qui renouent les souvenirs lors du sommeil doivent être précisés. Tous les cas observés de co-activation quasi simultanée de deux neurones connectés font apparaître un renforcement de leurs connexions. Comment les réactivations neuronales pourraient-elles alors affaiblir les synapses ?

Quoi qu'il en soit, leurs observations sont compatibles avec la théorie classique. Les connexions qui ne sont pas réactivées s'affaibliraient, tandis que celles qui le sont se renforceraient. Un tel phénomène augmenterait le contraste au sein des circuits de la mémoire et pourrait conduire à une diminution globale de la force synaptique, qui permettrait de limiter la consommation énergétique du cerveau. Pour prouver l'affaiblissement sélectif des synapses, il faudrait cependant des outils d'investigation bien plus performants que ceux dont on dispose aujourd'hui.

Bruno Poucet
Université d'Aix-Marseille et CNRS

l'hypothèse de l'homéostasie synaptique. Nous avons testé plus en détail cette hypothèse en examinant certains de ses corollaires.

Par exemple, elle implique que plus les connexions d'une aire cérébrale se modifient pendant l'éveil, plus cette aire doit avoir besoin de dormir. Ce besoin accru se manifesterait par une augmentation de l'amplitude et de la durée des ondes lentes lors du sommeil qui s'ensuit. Pour vérifier cette prédiction, nous avons entraîné des sujets à atteindre une cible, située sur un écran d'ordinateur, avec un curseur tournant sur lui-même. Ce type d'apprentissage fait intervenir le cortex pariétal droit. Et, en effet, les ondes lentes dans le cortex pariétal droit des sujets étaient plus amples durant la nuit qui suivait l'apprentissage que durant celle qui l'avait précédé.

Un rat qui court avec une partie de son cerveau endormie

De nombreuses autres expériences ont confirmé que l'apprentissage, et plus généralement l'activité synaptique, entraîne une augmentation locale du besoin de sommeil. Il y a peu, nous avons découvert que l'utilisation prolongée ou intensive de certains circuits neuronaux peut provoquer « l'endormissement » de groupes de neurones, bien que le reste du cerveau (et l'organisme) reste éveillé. Ainsi, lorsqu'un rat veille plus longtemps que d'habitude, certains neurones corticaux subissent de brèves périodes d'extinction, de la même façon que lors du sommeil lent. Pendant ce temps, le rat court, a les yeux ouverts et vaque à ses occupations habituelles.

Ce phénomène se nomme sommeil local et fait l'objet de multiples études. Nous avons montré que le cerveau de personnes privées de sommeil est sujet à des extinctions locales, et que ces extinctions sont plus fréquentes après un apprentissage intensif. Il semble que lorsque nous sommes restés éveillés trop longtemps ou que certains circuits neuronaux ont été surmenés, de petites parties du cerveau s'accordent un somme. Nombre d'erreurs de jugement et d'altérations de l'humeur résulteraient d'un sommeil local dans le cerveau de personnes épuisées, qui se croient parfaitement éveillées.

L'hypothèse de l'homéostasie synaptique implique aussi que le sommeil est particulièrement important dans l'enfance et à l'adolescence. En effet, de nombreuses études ont montré que ce sont des périodes d'apprentissage intensif, lors desquelles se produit un important remodelage synaptique. Des synapses se forment, se renforcent et s'affaiblissent bien plus vite qu'à l'âge adulte. L'affaiblissement sélectif durant le sommeil doit alors être crucial pour minimiser le coût en énergie de ce remodelage frénétique et pour favoriser la survie des circuits neuronaux les plus adaptés. Un manque de sommeil pendant ces périodes critiques du développement risque d'avoir des conséquences néfastes. Elles pourraient ne pas se limiter à des étourderies ou des erreurs de jugement occasionnelles et influer durablement sur les connexions cérébrales.

Nous envisageons d'étudier plus en détail les conséquences d'un manque de sommeil sur l'organisation des circuits neuronaux, ainsi que les autres implications de notre hypothèse. Nous aimerions notamment explorer l'effet du sommeil sur les aires cérébrales profondes, telles que le thalamus, le cervelet, l'hypothalamus et le tronc cérébral, et le rôle du sommeil paradoxal dans l'homéostasie synaptique. Peut-être confirmerons-nous alors que le sommeil est le prix à payer pour la plasticité cérébrale durant l'éveil. ■

LES AUTEURS

Giulio TONONI et Chiara CIRELLI sont professeurs de psychiatrie à l'Université du Wisconsin-Madison, aux États-Unis.

BIBLIOGRAPHIE

- O. Bushey *et al.*, **Sleep and synaptic homeostasis : structural evidence in *Drosophila***, *Science*, vol. 332, pp. 1576-1581, 2011.
- V. Vyazovskiy *et al.*, **Local sleep in awake rats**, *Nature*, vol. 472, p. 443-447, 2011.
- B. Poucet, **Le sommeil fait son cinéma**, *L'Essentiel Cerveau&Psycho*, n° 6, 2011.
- S. Diekelmann et J. Born, **The memory function of sleep**, *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 11, pp. 114-126, 2010.
- C. Cirelli et G. Tononi, **Is sleep essential ?**, *PLoS Biology*, vol. 6, pp. 1605-1611, 2008.

© Pour la Science - n° 432 - Octobre 2013

COLLECTION POUR LA SCIENCE LES PETITS THEMATIQUES

Des feuilletables numériques fiables et pratiques sur l'actualité scientifique

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

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

Des dizaines de sujets à découvrir sur

www.pourlascience.fr/petitsthematiques

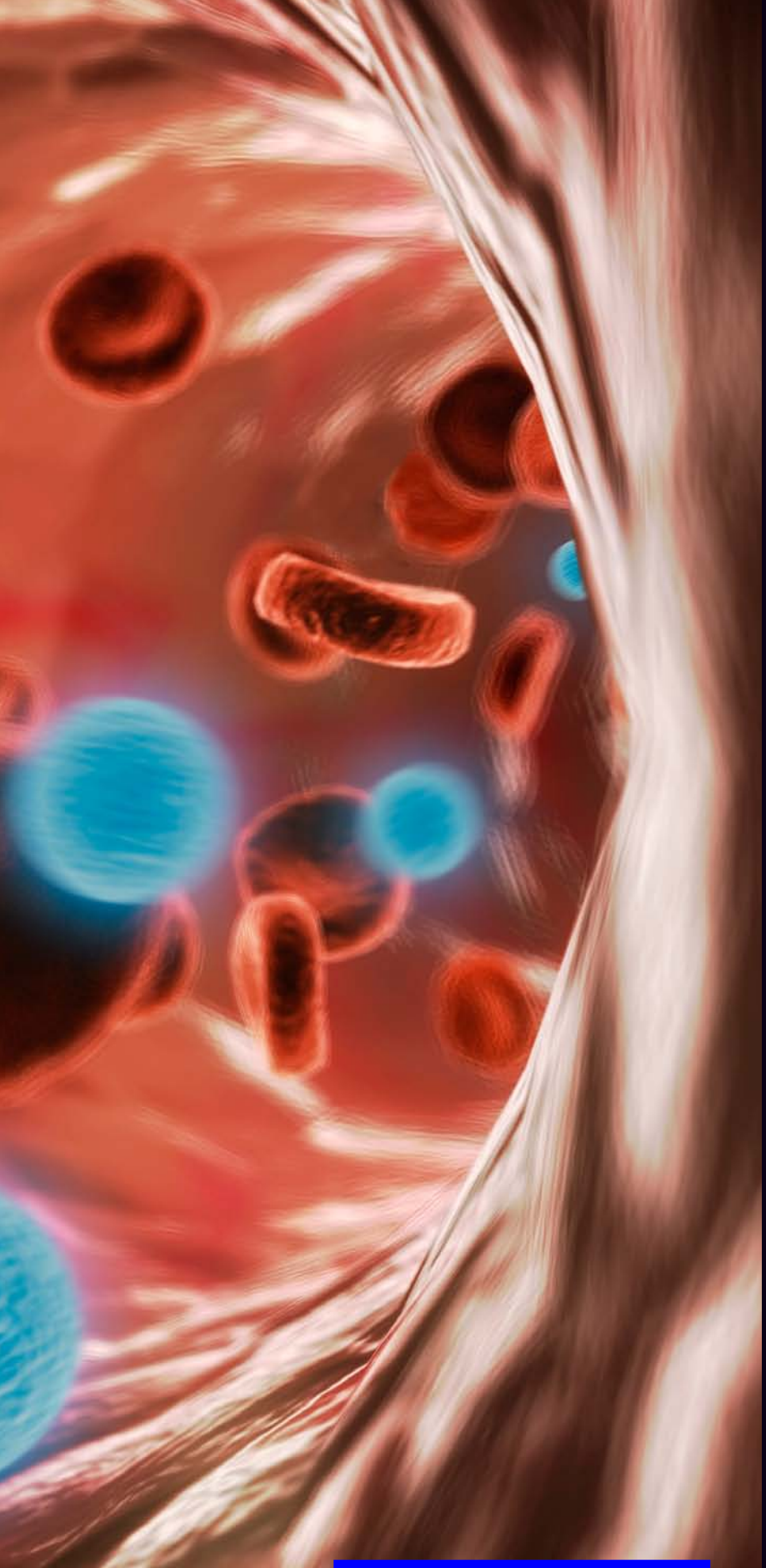
Des nanomédicaments pour le cerveau

Karine Andrieux et Patrick Couvreur

L'un des principaux obstacles au traitement des maladies cérébrales est la barrière très sélective qui sépare le sang et le cerveau. La nanomédecine ouvre aujourd'hui des pistes prometteuses pour franchir cette dernière.

L'ESSENTIEL

- Les traitements actuels des pathologies du système nerveux central, telle la maladie d'Alzheimer, ne sont que symptomatiques.
- La mise au point de thérapies curatives des maladies cérébrales se heurte à une difficulté : rares sont les molécules qui franchissent la barrière qui sépare la circulation sanguine et le cerveau.
- Les biologistes conçoivent des nanoparticules capables de franchir cette barrière, transporter des molécules actives et les libérer dans le cerveau.



1. ELABORER DES NANOPARTICULES qui transporteraient par voie sanguine les molécules thérapeutiques jusqu'au cerveau est l'un des enjeux de la nanomédecine.

Véhiculer – à l'aide de nanoparticules – des molécules thérapeutiques ou d'aide au diagnostic vers un organe, un tissu ou une cellule atteint d'une pathologie, tel est l'objectif de la nanomédecine. Développée depuis une dizaine d'années, cette branche de la recherche biomédicale était jusqu'à présent principalement focalisée sur le développement de nouvelles approches de thérapies anti cancéreuse ou anti-infectieuse. Dans ces domaines, la nanomédecine commence à faire ses preuves. Les premiers nanomédicaments sur le marché se révèlent pertinents pour des traitements brefs, mais intenses : l'utilisation de nanoparticules accroît les doses de molécules actives atteignant les cibles, tout en protégeant les tissus sains, ce qui augmente l'efficacité thérapeutique.

Forte de ces résultats, la recherche en nanomédecine investit maintenant un nouveau domaine, les maladies du système nerveux central. Le diagnostic des pathologies cérébrales telles que la maladie d'Alzheimer est peu sélectif, et leur traitement peu efficace. À ce jour, les personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer n'ont à leur disposition que des traitements symptomatiques. Or, selon les estimations publiées en 2013 par la coopération européenne ALCOVE sur la maladie d'Alzheimer, près de sept millions de personnes sont concernées en Europe – un constat qui devrait s'aggraver avec le vieillissement de la population. Plus que jamais, la recherche de traitements efficaces et de diagnostics plus précoces apparaît impérative.

L'un des principaux obstacles au diagnostic précoce des maladies cérébrales et à l'élaboration de traitements est anatomique : le cerveau est entouré et protégé par une barrière, nommée barrière hémato-encéphalique. Très étanche, cette barrière empêche le passage vers le cerveau des agents infectieux qui peuvent circuler dans le sang, mais, ce faisant, elle bloque aussi l'accès de molécules d'intérêt diagnostique ou thérapeutique. Des nanoparticules parviendraient-elles à franchir cette barrière ? Les premiers résultats sont prometteurs. Nous les exposons ici dans le cas particulier de la maladie d'Alzheimer, après une brève présentation de la maladie, de la barrière hémato-encéphalique et des nanoparticules utilisées.

La maladie d'Alzheimer et les syndromes apparentés sont les principales causes de démence (60 à 70 pour cent des cas). Selon le dernier rapport de l'Organisation mondiale de la santé, on estime à 35,6 millions le nombre de personnes atteintes de démence dans le monde en 2010, avec 7,7 millions de nouveaux cas chaque année. En Europe, on compterait près de 10 millions de cas de démence. En France, selon la Fondation Plan Alzheimer, 860 000 personnes âgées de plus de 65 ans et 32 000 personnes de moins de 65 ans seraient atteintes.

La maladie d'Alzheimer touche une personne sur 20 après 65 ans et une sur 5 au-delà de 85 ans. Elle s'accompagne d'une perte progressive de l'autonomie des patients. Avec le vieillissement de la population, sa prévalence devrait doubler dès 2040 en Europe de l'Ouest et tripler en Europe de l'Est. Or, malgré une recherche intensive menée par de nombreuses équipes, toutes les thérapies actuelles sont seulement palliatives et orientées vers le traitement des symptômes. Cette absence de thérapie curative est surtout due à une connaissance encore trop partielle des mécanismes de la maladie.

Maladie d'Alzheimer : les traitements actuels sont symptomatiques

La maladie d'Alzheimer est caractérisée par une détérioration continue des fonctions cérébrales due à une dégénérescence neuronale progressive et irréversible *(voir l'encadré page ci-contre)*. On constate notamment, dans le cerveau des personnes atteintes, une perte importante de neurones dits cholinergiques. Lors d'un influx nerveux, ces neurones transmettent l'information en libérant une molécule (un neurotransmetteur) nommée acétylcholine. Chez les individus atteints de la maladie, les neurones cholinergiques disparaissent peu à peu et l'on observe un déficit en acétylcholine. L'installation lente des troubles cliniques témoigne de la progression des lésions cérébrales. Les troubles de la mémoire des événements récents sont les premiers signes. Suivent les atteintes d'autres fonctions cognitives telles que l'apraxie (incapacité d'effectuer un mouvement ou une série de mouvements), l'agnosie (incapacité de reconnaître ce qui est perçu) ou l'aphasie (trouble de la production et de la compréhension de langage). Ce processus aboutit à une perte totale de l'autonomie des patients. La maladie est probablement le résultat d'un procédé multifactoriel impliquant des composantes génétiques et environnementales.

Les traitements actuels incluent deux classes de molécules thérapeutiques. Les premières reposent sur la correction du déficit en acétylcholine. Ces médicaments, par exemple la rivastigmine, sont des inhibiteurs de la cholinestérase, une enzyme qui dégrade l'acétylcholine. En empêchant la dégradation de l'acétylcholine, ils permettent d'augmenter la concentration en neurotransmetteurs et devraient ainsi pallier le déficit associé à la maladie. Toutefois, soulignons que ces traitements sont essentiellement symptomatiques. Leur utilisation est aussi limitée par leur faible biodisponibilité par voie orale (il faut des administrations fréquentes pour atteindre des doses de principe actif suffisantes dans l'organisme), et par d'importants effets secondaires (incluant nausée, diarrhée, incontinence urinaire et hépatotoxicité).

La seconde classe de médicaments utilise une molécule de synthèse, la mémantine, qui agit sur la régulation de la libération d'un autre neurotransmetteur, le glutamate. Le glutamate est trouvé dans les voies neuronales associées à l'apprentissage et la mémoire. Une altération de sa concentration peut entraîner un dysfonctionnement des neurones et une dégénérescence cérébrale semblable à celle observée chez les patients atteints de la maladie d'Alzheimer. Approuvée en 2003 par l'Agence américaine des produits alimentaires et médicamenteux, la mémantine est un antagoniste modéré d'un récepteur du glutamate, le récepteur NMDA. La mémantine serait capable de bloquer sélectivement les effets associés à la transmission anormale du neurotransmetteur. Toutefois, la mémantine ne permet pas de stopper efficacement l'évolution de la maladie.

Des études suggèrent que l'association des deux classes de médicaments produirait de meilleurs résultats cliniques, avec une correction partielle des troubles cognitifs. Aussi celle-ci est-elle de plus en plus pratiquée. Toutefois, aucun traitement n'est capable à l'heure actuelle d'empêcher la mort des neurones (c'est-à-dire d'arrêter la progression de la maladie), ni de remplacer les neurones perdus (c'est-à-dire

LES AUTEURS

Karine ANDRIEUX est chercheuse à l'Institut Galien Paris-Sud (UMR CNRS 8612, Université Paris-Sud) de la Faculté de pharmacie, à Châtenay-Malabry.

Patrick COUVREUR dirige la recherche sur les nanovecteurs à visée cérébrale au sein de l'Institut Galien Paris-Sud.

2. TROIS PRINCIPAUX TYPES de nanovecteurs sont utilisés. Les liposomes *(a)* sont des vésicules formées d'une ou de plusieurs bicouches de phospholipides ; les nanosphères *(b)* sont des particules formées d'une matrice de polymères ; et les nanocapsules *(c)* sont constituées d'un cœur aqueux ou huileux entouré d'une mince membrane de polymère.

© Pour la Science - n° 432 - Octobre 2013

de guérir de la maladie sans séquelles). C'est pourquoi de nombreuses équipes travaillent sur ce sujet.

Franchir la barrière hémato-encéphalique

Le traitement des maladies cérébrales est difficile, car nombre de molécules actives ne traversent pas la barrière hémato-encéphalique. Cette barrière est constituée d'une couche de cellules, dites endothéliales, qui tapisse les capillaires irriguant le cerveau *(voir l'encadré page 36)*. Dans l'organisme, tous les vaisseaux sanguins présentent une telle couche, nommée endothélium. Dans le cerveau, cependant, les cellules endothéliales adhèrent particulièrement bien à leurs voisines par de nombreuses liaisons étanches – nommées jonctions serrées – réalisées par des molécules qu'elles portent à leur surface.

Ces jonctions serrées empêchent le passage des molécules entre les cellules endothéliales. Aussi, seules les molécules lipophiles (attirées par les lipides, qui constituent notamment la membrane des cellules) sont capables de franchir la barrière hémato-encéphalique, en traversant les cellules elles-mêmes par diffusion passive. Et encore : leur passage dépend de leur lipophilie, de leur capacité de liaison aux protéines du plasma (certaines facilitent leur passage dans les cellules, d'autres au contraire les séquestrent) et de leur poids moléculaire (il doit être suffisamment petit).

À l'opposé, les substances hydrophiles ne peuvent traverser les parois lipidiques que si elles bénéficient d'un transporteur spécifique : elles doivent se lier à une molécule présente à la surface des cellules endothéliales. Les substances ainsi reconnues sont internalisées par invagination de la membrane cellulaire, transportées dans la cellule au sein de petites vésicules et sécrétées de l'autre côté de la barrière par un processus nommé transcytose. La quantité de molécules actives transmises par ce biais est faible et risque, soit de ne pas permettre d'atteindre des concentrations locales efficaces, soit d'obliger à administrer des doses délétères pour les tissus sains.

Différentes stratégies thérapeutiques ont été proposées pour faire passer des molécules peu diffusibles à travers la barrière hémato-encéphalique, mais les résultats sont limités. L'administration des principes actifs par voie intracérébrale peut être efficace, mais doit être réservée à des traitements aigus comme la chimiothérapie anticancéreuse, à cause de sa toxicité. Des substances capables de rendre la barrière temporairement perméable ont aussi été injectées, mais elles sont également réservées aux traitements antitumoraux. Ces techniques sont traumatisantes pour le patient, donc peu utilisables pour un traitement chronique, tel celui des maladies neurodégénératives.

Une autre stratégie consiste à modifier chimiquement les molécules actives, en augmentant leurs propriétés lipophiles ou en les conjuguant à une autre molécule fonctionnelle qui autoriserait leur passage à travers la barrière hémato-encéphalique. Cependant, ces modifications chimiques des molécules actives peuvent diminuer leur efficacité ou changer leur répartition dans l'organisme et faire apparaître des effets secondaires inattendus. Le développement de nanoparticules capables de véhiculer les principes actifs jusqu'au cerveau apparaît donc comme une alternative prometteuse.

La nanomédecine est l'utilisation en médecine de matériaux de quelques dizaines à quelques centaines de nanomètres ou nanostructurés, qui, de par leur structure, ont certains effets médicaux uniques, tels que la capacité à traverser les barrières biologiques ou le ciblage passif des tissus. Les approches de nanomédecine vont de l'utilisation médicale des nanomatériaux (par exemple la libération ciblée de molécules actives dans l'organisme) aux biodétecteurs nanoélectroniques (par exemple pour la détection de marqueurs dans les liquides biologiques), en passant par de nouvelles techniques d'imagerie. La

De la physiopathologie au diagnostic de la maladie d'Alzheimer

Si les grandes lignes du mécanisme produisant les symptômes de la maladie d'Alzheimer sont décrites, de nombreuses inconnues subsistent. Néanmoins, les praticiens savent aujourd'hui poser un diagnostic dès le début de la maladie. Le scénario proposé pour décrire l'évolution de la maladie s'appuie sur les différences observées aux échelles macroscopique et microscopique entre des cerveaux âgés sains et des cerveaux atteints de la pathologie.

À l'échelle macroscopique, tant la masse du cerveau atteint que son volume sont réduits. Le cerveau malade est caractérisé par une perte notable de neurones et de synapses dans le cortex cérébral et certaines régions sous-corticales. Les régions touchées sont atrophiées, notamment les lobes temporaux et pariétaux, des zones du cortex frontal, le cortex cingulaire et, surtout, l'hippocampe. À l'échelle microscopique, nombre de lésions moléculaires ont été détectées. La principale caractéristique est une accumulation de protéines anormales dans le cerveau âgé, qui entraîne des lésions oxydatives et inflammatoires pouvant conduire à un dysfonctionnement des synapses neuronales.

Selon le modèle actuel, la production progressive et l'accumulation d'un peptide nommé bêta-amyloïde joue un rôle central dans la genèse de la maladie. Ce peptide est un fragment de la protéine APP *(membrane-associated amyloid precursor protein)*. Sécrété par les cellules sous une forme soluble, il s'agrège peu à peu en plaques insolubles à l'extérieur des cellules. Dans les neurones, une autre protéine, tau, anormalement phosphorylée, forme dans un second temps semble-t-il, des dépôts de filaments entrelacés nommés neurofibrilles. Détectables dans le cerveau des malades décédés, ces plaques et dépôts caractéristiques de la maladie permettent un diagnostic *post mortem* indubitable.

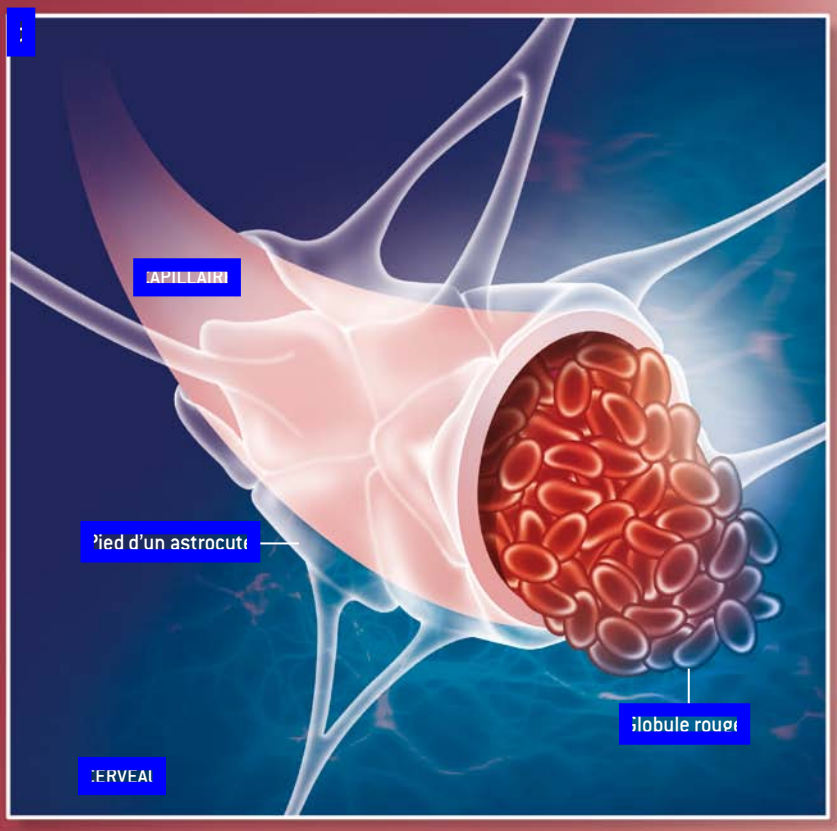
Il semble que la maladie ne soit diagnostiquée que chez 50 pour cent des patients et que seuls 30 pour cent des personnes atteintes bénéficient d'une prise en charge. Cependant, les connaissances sur la maladie ont considérablement progressé ces dernières années. Un diagnostic précoce, lorsque le patient n'est atteint que de troubles légers de la mémoire, est aujourd'hui possible et permet de mettre en place une prise en charge (principalement non médicamenteuse : stimulation cognitive, activité physique, musicothérapie) qui retarde l'apparition des symptômes.

Ce diagnostic est fondé sur une expertise neuropsychologique (la réponse du patient à un questionnaire précis) qui détecte les malades avec une sensibilité (probabilité que le test soit positif si la personne est atteinte) de 80 pour cent et une spécificité (probabilité que le test soit négatif si la personne n'est pas atteinte) de 90 pour cent.

S'ajoutent d'autres outils tels que l'imagerie cérébrale ou les dosages de biomarqueurs après une ponction lombaire, qui permettent de diagnostiquer des stades précoces de la maladie. Ces examens sont encore malheureusement trop peu pratiqués et le diagnostic reste souvent posé à un stade plus évolué de la maladie, quand les troubles sont déjà devenus invalidants.

DEUX STRATEGIES POUR TRAVERSER

Comment franchir la barrière hémato-encéphalique, qui isole le sang du cerveau ? En s'inspirant des mécanismes qui permettent l'entrée sélective de certaines cellules ou molécules dans le cerveau. La barrière hémato-encéphalique est une couche de cellules dites endothéliales qui tapisse la paroi interne des capillaires irriguant le cerveau. Cette barrière est renforcée par les pieds d'une famille de cellules cérébrales en forme d'étoiles, les astrocytes *(a)*. Grâce à de nombreuses jonctions serrées entre ses cellules *(b)*, la barrière hémato-encéphalique est si étanche que les molécules nécessaires au fonctionnement du cerveau la franchissent en traversant les cellules, grâce à des récepteurs spécifiques présents à leur surface. Elles sont transmises aux cellules cérébrales *via* les astrocytes. Par ailleurs, les cellules de l'immunité se glissent entre les cellules de la barrière en cas d'infection du cerveau. Les nanomédicaments envisagés pour atteindre le cerveau utilisent ces deux modes de passage de la barrière *(b, ❶ et ❷)*.



Diagnostic précoce et nanoparticules

Les caractéristiques des nanoparticules en font des candidats intéressants pour un diagnostic plus précoce des maladies. Dans le diagnostic par imagerie, elles peuvent, en ciblant des molécules impliquées dans la maladie, augmenter le contraste des régions atteintes et ainsi améliorer leur détection. Dans le diagnostic par quantification dans le sang de molécules indiquant des désordres cellulaires, elles offrent, par un ciblage adéquat, un moyen simple de détection et d'analyse à haut débit.

recherche galénique s'est appuyée sur de nouveaux concepts physico-chimiques et sur le développement de nouveaux matériaux (synthèse de nouveaux polymères par exemple), afin d'imaginer des systèmes d'administration submicroniques capables de protéger la molécule active de la dégradation et d'en contrôler la libération dans le temps et dans l'espace.

Trois générations de vecteurs nanométriques

On distingue différents types de nanoparticules – aussi nommées vecteurs colloïdaux – remplissant ces conditions. Les liposomes sont des vésicules biocompatibles et biodégradables, composées d'une bicouche (liposomes unilamellaires) ou de plusieurs bicouches (liposomes multilamellaires) de phospholipides délimitant un ou plusieurs compartiments aqueux. Des principes actifs hydrophiles sont encapsulés dans la phase aqueuse, tandis que les molécules lipophiles sont localisées dans la ou les bicouches *(voir la figure 2a)*.

Les nanoparticules sont en général constituées de polymères (de préférence biodégradables) ou de lipides. Elles peuvent être de type matriciel *(voir la figure 2b)* ou de type réservoir *(voir la figure 2c)*. Dans les nanoparticules matricielles – ou nanosphères –, le principe actif est dispersé ou dissous dans la matrice polymère ou lipidique et est libéré par simple diffusion ou à la suite de la biodégradation dans l'organisme du matériel support. Les nanoparticules de type réservoir – ou nanocapsules – sont constituées d'un noyau central en général liquide, entouré par une mince paroi de polymère ou de lipide dont l'épaisseur ne dépasse pas quelques nanomètres.

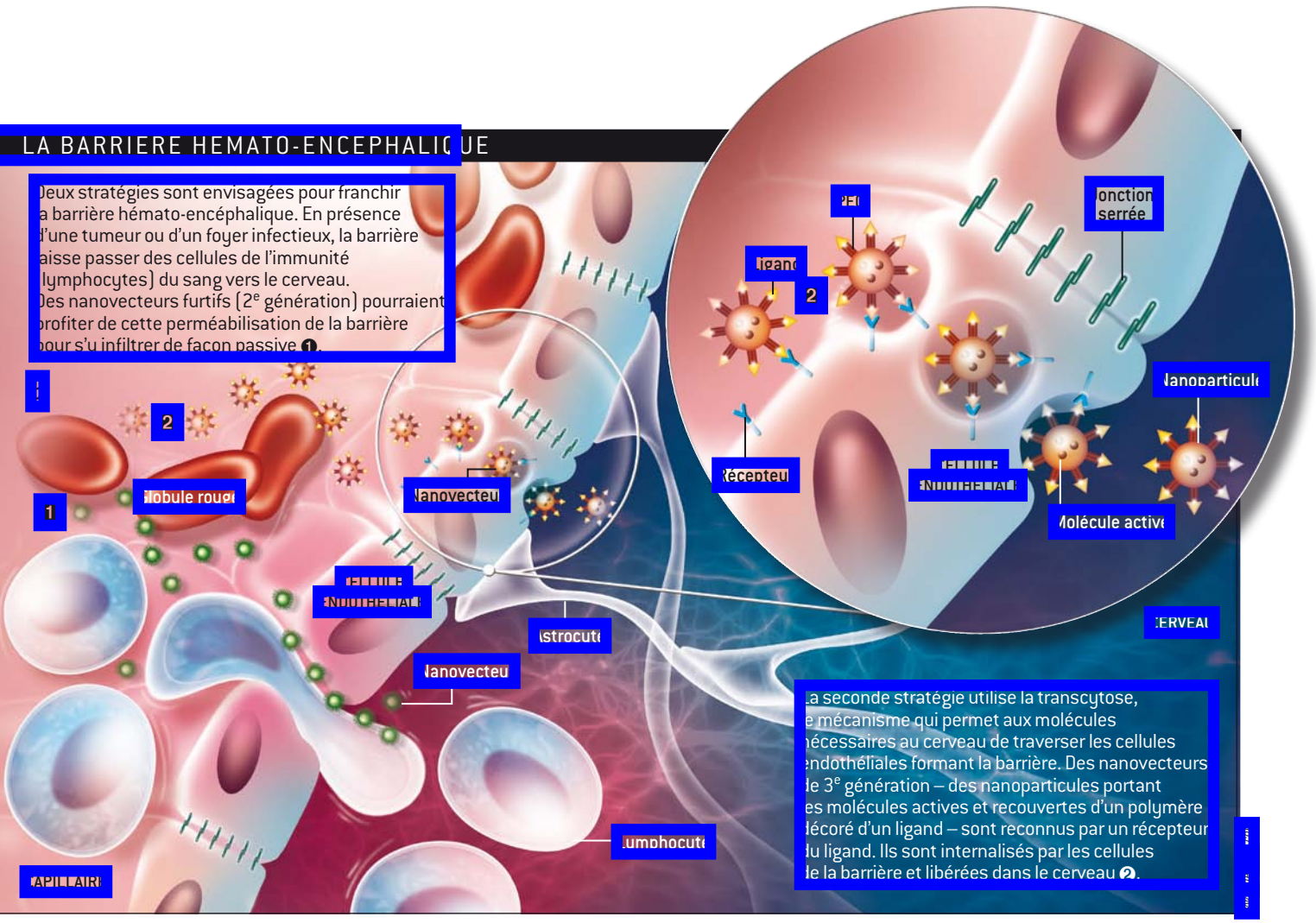
Trois générations de vecteurs colloïdaux ont été mises au point au fil des dix dernières années, dont deux ouvrent des perspectives intéressantes pour le traitement et le diagnostic des maladies cérébrales. Ces générations diffèrent par leur structure, qui influe directement sur leur devenir dans l'organisme.

Les vecteurs de première génération sont des nanoparticules et liposomes de surface

© Pour la Science - n° 432 - Octobre 2013

LA BARRIERE HEMATO-ENCEPHALIQUE

Deux stratégies sont envisagées pour franchir la barrière hémato-encéphalique. En présence d'une tumeur ou d'un foyer infectieux, la barrière laisse passer des cellules de l'immunité (lymphocytes) du sang vers le cerveau. Des nanovecteurs furtifs (2e génération) pourraient profiter de cette perméabilisation de la barrière pour s'y infiltrer de façon passive ❶.



La seconde stratégie utilise la transcytose, le mécanisme qui permet aux molécules nécessaires au cerveau de traverser les cellules endothéliales formant la barrière. Des nanovecteurs de 3e génération – des nanoparticules portant les molécules actives et recouvertes d'un polymère décoré d'un ligand – sont reconnus par un récepteur du ligand. Ils sont internalisés par les cellules de la barrière et libérées dans le cerveau ❷.

hydrophobe. Lorsqu'ils sont administrés par voie intraveineuse, ils se lient fortement et très vite, par interactions dites hydrophobes, avec certaines protéines du plasma (immunoglobulines de type G, fibronectine, etc.), rassemblées sous le nom d'opsonines. Les opsonines sont reconnues par des récepteurs spécifiques portés par une famille de cellules immunitaires, les macrophages. Ainsi, quelques minutes après leur administration, les vecteurs colloïdaux, décorés par les opsonines qui se sont adsorbées à leur surface, sont capturés par les macrophages, principalement du foie et de la rate, qui les internalisent et les dégradent.

Cette distribution des vecteurs dans le foie et la rate s'explique par la structure de l'endothélium vasculaire, particulièrement discontinu dans ces tissus, ce qui favorise le passage des colloïdes (liposomes et nanoparticules). Elle a été mise à profit pour transporter des molécules d'intérêt thérapeutique vers le foie et la rate, visant à diagnostiquer (particules d'oxyde de fer Endorem®) et traiter (nanoparticules polymériques actuellement testées en phase clinique par la société *Bioalliance*) différentes pathologies, notamment certains cancers tels que les hépatocarcinomes et les métastases hépatiques.

Des nanoparticules furtives

En revanche, si l'on veut éviter que les vecteurs n'atteignent le foie, on peut modifier leur surface à l'aide de polymères hydrophiles et flexibles comme les polyéthylène-glycols (PEG), les polysaccharides, les poloxamers ou les poloxamines. Ceux-ci empêchent certaines protéines, en particulier les opsonines, de s'adsorber à la surface de tes nanovecteurs dits de deuxième génération par un effet de répulsion stérique (les protéines n'ont plus assez de place pour accéder – donc se lier – au vecteur).

Après administration intraveineuse, ces vecteurs, dits pégylés, persistent plus longtemps dans le plasma et sont moins capturés par le foie et la rate. Ils sont aussi dits furtifs, car ils sont moins reconnus, ou identifiés avec retard, par les macrophages du foie, de la rate et de la moelle osseuse. Ce caractère est d'autant plus prononcé que les vecteurs sont de petite taille. En conséquence, parce qu'ils circulent longtemps dans le sang, ils ont une probabilité importante de traverser les endothéliums vasculaires ayant une perméabilité accrue, tels ceux localisés près des tumeurs ou des foyers infectieux, où règne une importante inflammation. Cet effet de perméabilité et de rétention tissulaire permet ainsi le ciblage passif de tissus localisés hors du territoire hépato-splénique, telles les tumeurs.

Tous les endothéliums vasculaires, notamment la barrière hémato-encéphalique, sont concernés. Celle-ci peut être rendue perméable au contact de tumeurs telles que les gliomes, et de nombreuses recherches fondées sur les vecteurs de deuxième génération tentent d'exploiter cette propriété. Il est aussi probable qu'en présence d'une forte inflammation qui accompagnerait les stades avancés d'une maladie neurodégénérative, la barrière hémato-encéphalique serait modifiée, voire plus perméable. Toutefois, cette approche interviendrait trop tard dans

'évolution de la maladie, avec le risque de ne servir qu'à maintenir les personnes traitées à un stade de démence avancé.

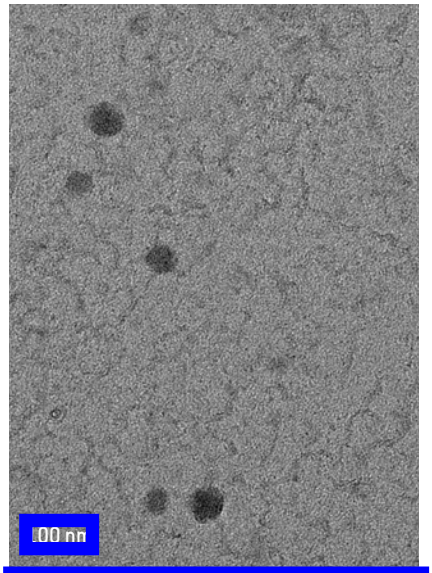
Néanmoins, certains vecteurs de deuxième génération ont montré leur capacité à franchir la barrière hémato-encéphalique intacte grâce à l'adsorption à leur surface d'une protéine impliquée dans le transport de lipides dans le sang, l'apolipoprotéine E. En temps normal, cette protéine et d'autres s'assemblent avec des lipides, formant une lipoprotéine (LDL) qui circule dans le sang et apporte au cerveau les lipides nécessaires à son fonctionnement. Les cellules endothéliales de la barrière hémato-encéphalique présentent de nombreux récepteurs des lipoprotéines qui reconnaissent l'apolipoprotéine E. En imitant les lipoprotéines, les nanoparticules pégylées décorées de l'apoprotéine E seraient reconnues par ces récepteurs et franchiraient ainsi la barrière hémato-encéphalique par transcytose, à l'instar des lipoprotéines.

Quand les vecteurs de deuxième génération sont décorés de ligands (anticorps, peptides, sucres, etc.), ils deviennent capables de reconnaître de façon sélective des antigènes ou des récepteurs qui sont surexprimés à la surface des cellules cibles (cellules cancéreuses, cellules infectées ou cellules endothéliales cérébrales). La conception de ces vecteurs dits de troisième génération est donc fondée sur la construction d'objets supramoléculaires composés d'un cœur de type liposome ou nanoparticule, d'une couche de polymères hydrophiles et flexibles (par exemple le PEG) pour limiter la reconnaissance par le foie et la rate, et d'un ligand à l'extrémité de certaines chaînes de PEG.

Si le site visé est cérébral, plusieurs cibles localisées à la surface des cellules endothéliales cérébrales peuvent être mises à profit, tels le récepteur de la transferrine (transporteur d'ions fer) ou celui des lipoprotéines LDL, qui y sont plus abondants que dans d'autres cellules. Par exemple, des ligands tels que la transferrine ou un anticorps dirigé contre son récepteur ont été greffés à la surface de nanoparticules et de liposomes afin de leur permettre de traverser la barrière hémato-encéphalique. Plusieurs études ont montré l'efficacité de cette stratégie dans le traitement d'un modèle animal d'ischémie cérébrale (arrêt de l'apport d'oxygène dû, par exemple, à l'obturation d'un vaisseau sanguin).

Ainsi, les vecteurs de deuxième et troisième génération offrent la possibilité de traverser la barrière hémato-encéphalique et de véhiculer dans le cerveau des molécules actives pour un traitement ou des agents de contraste pour un diagnostic. Ces vecteurs ont l'avantage d'être biocompatibles, peu toxiques, faciles à préparer et capables de contrôler la libération des principes actifs encapsulés, grâce à la biodégradation connue des vecteurs dans les fluides biologiques.

Les premiers travaux expérimentaux sur l'animal sont en cours. Par exemple, en 2008, Barnabas Wilson, du Collège de pharmacie JSS à Ooty, en Inde, et ses collègues ont proposé d'encapsuler de la rivastigmine dans des nanoparticules polymériques de poly(*n*-butyl cyanoacrylate) ou PBCA recouvertes de polysorbate 80 (contenant du PEG), afin d'augmenter le passage de la rivastigmine dans le cerveau et de diminuer ses effets secondaires. Ce système leur permet d'augmenter de 3,8 fois la capture de la rivastigmine dans le cerveau après injection intraveineuse chez le rat, avec une réduction des effets secondaires.



3. NANOPARTICULES BIODEGRADABLES de deuxième génération composées de copolymère d'alkylcyanocrylate et de polyéthylène glycol, observées en microscopie électronique à transmission.

Cibler le peptide bêta-amyloïde

Parmi ces recherches, nombre d'entre elles visent à utiliser, comme cible principale des approches thérapeutiques et diagnostiques, un peptide neuronal dont l'agrégation anormale en plaques semble jouer un rôle majeur dans la maladie d'Alzheimer, le peptide bêta-amyloïde *(voir l'encadré page 35)*. L'objectif est de construire des vecteurs de troisième génération capables de traverser la barrière hémato-encéphalique et de cibler le peptide bêta-amyloïde. Pour ce faire, différentes molécules connues comme ligands du peptide ont été testées.

La curcumine, notamment, est une molécule thérapeutique potentielle, car non seulement elle interagit *in vitro* avec le peptide, mais, ce faisant, elle inhibe son agrégation. Toutefois, cette molécule fragile est vite dégradée en milieu biologique, ce qui limite fortement son action. En la protégeant contre la dégradation et en la conduisant jusqu'au cerveau, son encapsulation dans des vecteurs colloïdaux pallierait cette difficulté.

C'est ce qu'ont proposé en 2010 Rohit Mulik et ses collègues, de l'Université Bharati Vidyapeeth, en Inde, en préparant des nanosphères de PBCA chargées en curcumine et décorées d'apolipoprotéine E3 pour exploiter la transcytose à travers

BIBLIOGRAPHIE

- D. Brambilla *et al.*, **Pegylated nanoparticles bind to and alter amyloid-beta peptide conformation : towards engineering of functional nanomedicines for Alzheimer's disease**, *ACS Nano*, vol. 6, pp. 5897-5908, 2012.
- D. Brambilla *et al.*, **Nanotechnologies for Alzheimer's disease : diagnosis, therapy, and safety issues**, *Nanomedicine*, vol. 7, pp. 521-540, 2011.
- H. Karatas *et al.*, **A nanomedicine transports a peptide caspase-3 inhibitor across the blood–brain barrier and provides neuroprotection**, *J. Neurosci.*, vol. 29, pp. 13761-13769, 2009.
- E. Garcia-Garcia *et al.*, **Colloidal carriers and blood brain barrier (BBB) translocation : a way to deliver drugs to the brain ?**, *Int. J. Pharm.*, vol. 298, pp. 274-292, 2005.

© Pour la Science - n° 432 - Octobre 2013

a barrière hémato-encéphalique *via* le récepteur des lipoprotéines LDL. Sur des cultures de neurones, ils ont montré que la toxicité due à l'agrégation du peptide bêta-amyloïde est encore plus inhibée par ces nanovecteurs que par la curcumine libre.

D'autres résultats plus étonnants montrent que le peptide bêta-amyloïde aurait de l'affinité pour les nanoparticules elles-mêmes. En 2008, Celia Cabaleiro-Lago, de l'University College Dublin, en Irlande, et ses collègues, ont proposé l'utilisation de nanoparticules de 40 nanomètres préparées à partir d'un copolymère (PNIPAAM-co-PBAM) pour retarder l'agrégation du peptide bêta-amyloïde. Ils ont observé que ces particules perturbent l'agrégation en retardant, voire en bloquant, l'amorçage (la nucléation) des agrégats. Plus récemment, en 2012, notre équipe a mis en évidence que des nanoparticules recouvertes de PEG ont une affinité pour le peptide bêta-amyloïde et sont capables de le capturer, même dans un environnement aussi riche que du sérum (le sang dont on a ôté les cellules).

Tous ces résultats, même s'ils ont été en général obtenus *in vitro* et nécessitent des confirmations *in vivo*, devraient aider à mieux comprendre l'agrégation du peptide bêta-amyloïde dans la maladie d'Alzheimer et à identifier et concevoir des nanoparticules avec des propriétés de surface optimales pour obtenir un effet bénéfique sur les patients atteints de la maladie.

Diagnostiquer plus tôt la maladie

Les nanoparticules pourraient aussi faciliter la mise en place d'un diagnostic plus précoce des maladies cérébrales. Elles sont de plus en plus utilisées pour le diagnostic de diverses maladies. Des nanoparticules magnétiques d'oxyde de fer servent déjà, par exemple, d'agent de contraste pour l'imagerie par résonance magnétique du foie.

Dans le cas de la maladie d'Alzheimer, un diagnostic précoce, avant que les symptômes cliniques ne se manifestent, est critique pour agir avant la formation des lésions irréversibles des neurones qui conduisent à la démence. Et ce d'autant plus que peu de méthodes existent pour examiner le cerveau humain vivant. La formation des agrégats de peptide bêta-amyloïde étant le premier phénomène visible de la maladie, beaucoup d'efforts ont été dirigés vers la détection et l'identification *in vivo* des plaques amyloïdes par l'imagerie avec des nanoparticules, telles celles d'oxyde de fer ciblant le peptide bêta-amyloïde, mises au point en 2005 par Jolanda de Vries, du Centre des sciences de la vie moléculaires de Nimègue, aux Pays-Bas, et ses collègues. Une autre approche est fondée sur la détection et la quantification des biomarqueurs sanguins de la maladie d'Alzheimer, le peptide bêta-amyloïde et la protéine tau. Pour l'heure, cependant, seules des nanoparticules métalliques (en or, par exemple) ont été décrites comme des outils potentiels pour cette approche.

Ainsi, de par leur biocompatibilité, leur biodégradation et leur capacité de ciblage, les nanoparticules représentent une piste prometteuse pour améliorer le traitement et le diagnostic de certaines maladies cérébrales, telle la maladie d'Alzheimer. Toutefois, nous sommes encore loin de disposer d'une formulation à base de vecteurs colloïdaux pour traiter cette maladie. ■

La naissance de L'ÉCRITURE EN ÉGYPTE

Gwenola Graff

Les gravures rupestres, les vases peints ou les sceaux de l'Égypte du IVe millénaire relèvent de cinq systèmes graphiques. Les plus anciens de ces systèmes préfigurent l'écriture hiéroglyphique

La volonté d'enregistrer des messages se manifeste dès la fin du Paléolithique, avec les premières peintures pariétales apparues il y a 35 000 ans. Les plus anciennes connues sont celles de la grotte Chauvet, dans le Sud-Est de la France. Dans des grottes occupées plus tardivement, telle celle de Lascaux (environ 18 000 ans avant notre ère), on a même retrouvé des signes non figuratifs (traits, triangles ouverts, points, etc.) à côté des grandes peintures d'animaux. Les multiples études effectuées n'ont pu percer leur signification. D'autres ensembles de signes ont été découverts ailleurs dans le monde, notamment en Égypte, et sur des supports variés, tels que des parois rocheuses, des vases ou des os.

Nous désignerons ces ensembles par l'expression « systèmes graphiques ». Un certain nombre de règles s'y appliquent, aussi bien pour la construction de chaque élément que pour leur combinaison.

S'agit-il d'écritures ? Le débat est vif, en particulier pour les signes non figuratifs. On considère classiquement que l'écriture a été inventée de façon indépendante en Égypte, vers –3250, et en Mésopotamie, quelque 200 ans plus tard, ainsi qu'en Chine et en Amérique (dans le monde maya), au 1er millénaire avant notre ère. Une écriture, nommée proto-élamite, aurait aussi été élaborée en Iran à peu près en même temps qu'en Mésopotamie, mais elle n'est pas déchiffrée aujourd'hui. Existerait-il d'autres foyers d'invention de l'écriture, plus anciens ?

L'une des raisons de la polémique est l'absence de consensus sur la définition de l'écriture. Je proposerai et utiliserai ici une définition fondée sur les travaux récents de spécialistes de l'écriture, et présenterai ensuite les systèmes graphiques égyptiens, que j'étudie depuis les années 2000 et que l'on commence à mieux comprendre. Je montrerai ainsi que, si ces systèmes graphiques ne peuvent être considérés comme des écritures, ils en constituent une sorte d'expérience préparatoire.

Dans un article publié en 1993, l'égyptologue français Pascal Vernus a défini l'écriture comme un système de signes capable d'encoder des énoncés linguistiques pour former un message ; ce dernier doit pouvoir être déchiffré hors de son contexte de production (c'est-à-dire à un

L'ESSENTIEL

- Les plus anciens écrits égyptiens connus datent de 3250 avant notre ère.
- À cette époque, plusieurs systèmes graphiques existent déjà. Il s'agit d'ensembles structurés de signes retrouvés sur divers supports, tels que des roches ou des vases.
- Les Égyptiens se sont ainsi habitués à attribuer un sens à des signes graphiques, indépendamment de leur support, et à les associer selon des règles précises.
- L'innovation ayant donné naissance à l'écriture a été l'attribution d'un caractère phonétique aux signes.

© Pour la Science - n° 432 - Octobre 2013

autre moment ou dans un autre lieu, par des personnes différentes du scripteur et qui n'ont pas les mêmes références culturelles), du moment que l'on connaît le code. Au début des années 2000, John Baines, de l'Université d'Oxford au Royaume-Uni, soulignait que l'écriture doit enregistrer une information. Dans un ouvrage publié en 2001, Anne-Marie Christin, de l'Université Paris Diderot, indiquait que l'écriture unit « deux modes de communication hétérogènes et complémentaires qui la précédaient depuis longtemps : l'image [...] et la langue ». Elle précisait ainsi un aspect fondamental de l'écriture, déjà souligné par Jean-François Champollion (1790-1832) : l'écriture doit restituer les sons d'une langue.

Une écriture transcrit les sons d'une langue

On ne peut donc pas déchiffrer une écriture sans connaître la langue qu'elle note – tandis qu'on peut comprendre des systèmes de logogrammes, où un signe représente un objet, indépendamment de la langue. Le déchiffrement des écritures antiques n'a d'ailleurs été possible que grâce à la parenté entre les langues qu'elles transcrivaient et d'autres encore parlées. Champollion, par exemple, a compris que le copte, la langue liturgique des chrétiens d'Égypte, était dérivé de l'ancienne langue du pays (tandis que la langue parlée à son époque, l'arabe égyptien, était celle des envahisseurs du VII^{e} siècle). Il a alors pu reconstituer approximativement cette langue et déchiffrer les hiéroglyphes. En revanche, on ne sait pas lire le proto-élamite iranien – c'est l'une des dernières écritures non déchiffrées –, car on ignore la langue transcrite.

1. LES VASES DECORES *(D-WARE)* apparaissent autour de 3700 avant notre ère, plus de quatre siècles avant l'écriture. La scène représentée ici évoque le renouvellement de la vie après la mort. Elle comprend un élément dominant (la peau animale tendue sur des bâtons, en bas, qui renvoie à un rite d'enveloppement des défunts dans une peau au V^{e} millénaire avant notre ère) et des éléments secondaires, déterminés par des règles d'association. Ces systèmes graphiques représentent une étape déterminante sur la voie de l'invention de l'écriture.

En Égypte, l'écriture est apparue à la fin du IVe millénaire avant notre ère. Les plus anciennes inscriptions hiéroglyphiques connues ont été découvertes en 1986 par l'équipe de l'archéologue allemand Günther Dreyer, dans la tombe U-j de la nécropole d'Umm el-Qa'ab, à Abydos, appartenant au roi Scorpion. Ces inscriptions figuraient sur de petites étiquettes en os, en bois et en ivoire attachées à des jarres. Très courtes, elles ne comportent que quelques signes (voire un seul).

Les hiéroglyphes sont figuratifs, c'est-à-dire qu'ils représentent des éléments identifiables. Quelqu'un ne sachant pas les lire peut reconnaître une vache, une main, un homme assis, un escalier, etc. Cependant, certains signes ne signifient pas ce qu'ils figurent, mais ont une valeur phonétique. Ainsi, sur un hiéroglyphe de la tombe U-j, un dessin de cigogne est associé à celui d'un siège *(voir la figure 4)*. La cigogne se dit « ba » en égyptien, le siège « set ». « Basset » est le nom d'une ville antique du Nord de l'Égypte. Les deux signes de la cigogne et du siège ne veulent pas dire « le siège de l'oiseau », mais renvoient, grâce aux sons, à une réalité non liée aux objets représentés. En d'autres termes, ce sont des sortes de rébus. Dans les cas ambigus, pour préciser qu'un signe figuratif doit être lu phonétiquement, un petit trait vertical était ajouté derrière lui.

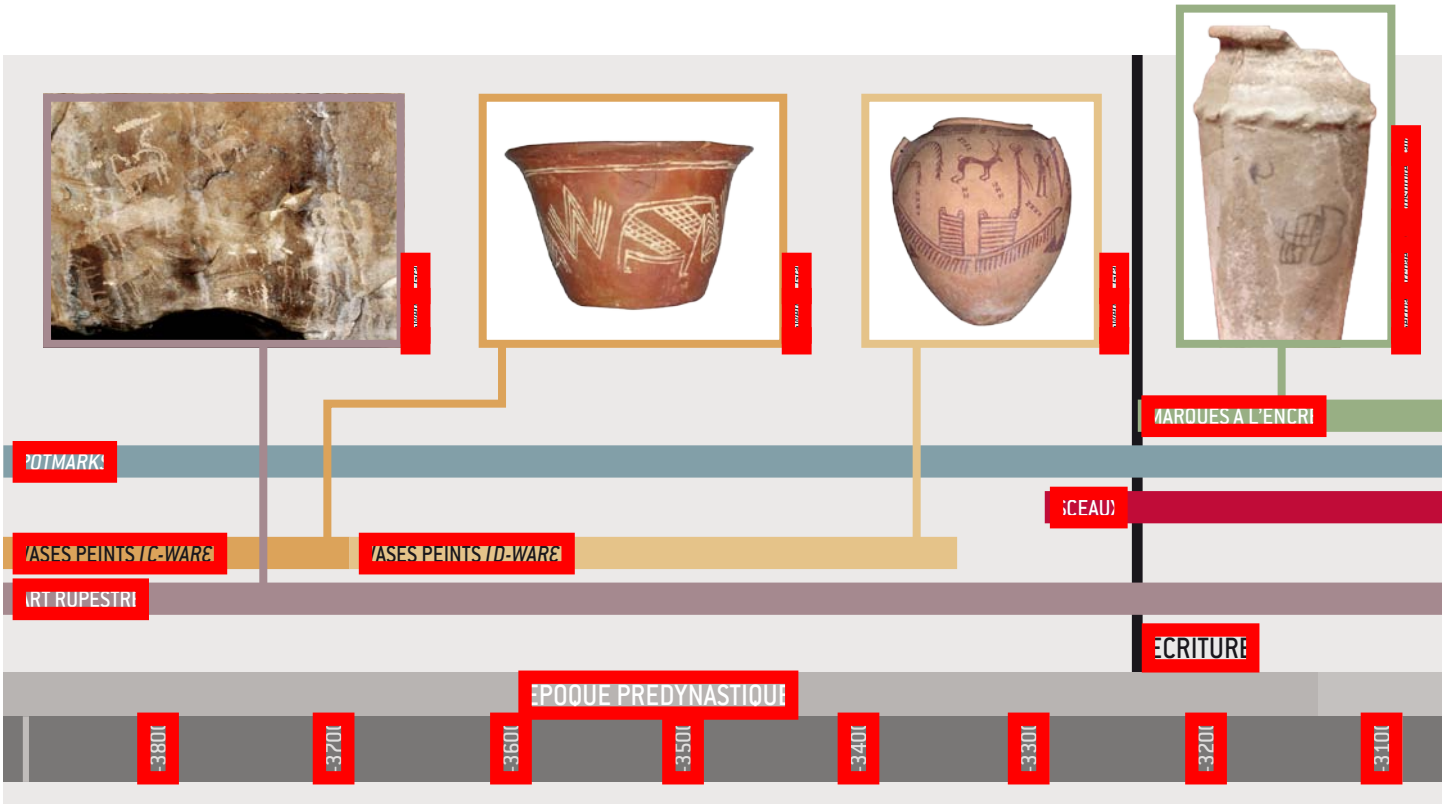
Au moment où l'écriture est née, cinq systèmes graphiques avaient déjà vu le jour en Égypte *(voir la figure 2)* : les gravures rupestres (effectuées sur des roches), les peintures sur vases, les sceaux, les *potmarks* (des incisions sur des récipients) et les marques à l'encre. Certains ont été retrouvés dans la tombe U-j, avec les premiers écrits. Quelques-uns ont encore perduré plusieurs siècles alors que d'autres s'étaient déjà éteints. Ils semblaient remplir des fonctions différentes (comptable, rituelle, politique ou funéraire). Décrivons-les plus en détail.

Des roches gravées dans le désert

Les gravures rupestres ont été découvertes sur des roches dans le désert. On en trouve aussi bien à l'Ouest du Nil, dans le Sahara, qu'à l'Est. Les plus anciennes, dans la région d'Assouan, remontent au Paléolithique (sur les sites de Qurta et du Wadi Abu Subeira), environ 18 000 ans avant notre ère. Elles sont contemporaines des peintures de Lascaux. Les roches gravées sont en général situées dans les oueds, des vallées sèches creusées par d'anciens cours d'eau temporaires. Ces vallées constituent des voies naturelles pour traverser les zones désertiques.

Jusqu'à la fin du IVe millénaire avant notre ère, les scènes gravées représentent principalement la chasse aux animaux du désert (antilopes, gazelles, girafes), la domination par la violence (combats, massacres d'ennemis) et des rites funéraires. Elles traduisent une thématique récurrente à cette époque : la maîtrise du chaos par les forces de l'ordre, c'est-à-dire le souverain ou les dieux. Le désert est une zone frontière, de transit, dangereuse et incontrôlée, d'où probablement la nécessité d'y laisser des marques de telles scènes.

À l'époque pharaonique (à partir de -3150), les voies de passage continuent à être ponctuées de gravures. Certaines représentent des scènes de navigation, ce qui s'expliquerait par les bateaux transportés en pièces détachées par les expéditions traversant le désert ; à l'arrivée aux ports de la mer Rouge, les bateaux étaient remontés. Cependant, la plupart des gravures de cette époque sont plutôt des inscriptions en hiéroglyphes, laissées



© Pour la Science - n° 432 - Octobre 2013

l'occasion d'expéditions militaires, commerciales ou liées à l'exploitation minière du désert. Elles présentent le commandant de l'expédition, le nombre d'hommes, le pharaon commanditaire, l'objectif du déplacement…

Sur les céramiques, des peintures qui se codifient

Le deuxième système graphique égyptien est constitué de scènes complexes peintes sur des récipients en céramique, entre –3900 et –3350. Jusqu'à –3700, les supports sont principalement des bouteilles et de larges coupes (semblables à des bols ou des écuelles), rouges avec des peintures blanches. On les nomme des *White cross-lined ware* ou *C-ware* (céramique à décor en hachures blanches). Entre –3700 et –3350, les céramiques sont plutôt des vases d'une quinzaine de centimètres de hauteur, beige rosé avec des peintures brunes à rouge violacé. On les qualifie de *Decorated ware* ou *D-ware* (céramique décorée).

Sur les *C-Ware*, les éléments peints sont répartis de façon plus ou moins aléatoire à la surface du récipient. En revanche, sur les *D-Ware*, leur disposition obéit à des règles de composition. Les éléments qui déterminent la mise en place du décor se situent sur la moitié supérieure du vase (entre les deux anses): ils sont peints en premier et les autres éléments sont placés par rapport à eux.

Les éléments représentés sont beaucoup moins variés que sur les vases de la première période: tout devient très codifié, il n'y a plus de place pour l'improvisation ou la fantaisie. Les signes sont presque toujours organisés autour d'un couple d'éléments, choisi parmi deux possibles: soit une femme vue de face, les bras au-dessus de la tête, associée à un addax (une grosse antilope du désert), soit un arbre associé à une peau animale tendue sur des bâtons croisés. On a découvert environ 60 vases avec le couple femme-addax et 85 avec le couple arbre-peau. Les deux couples ne sont jamais représentés ensemble sur un même vase.

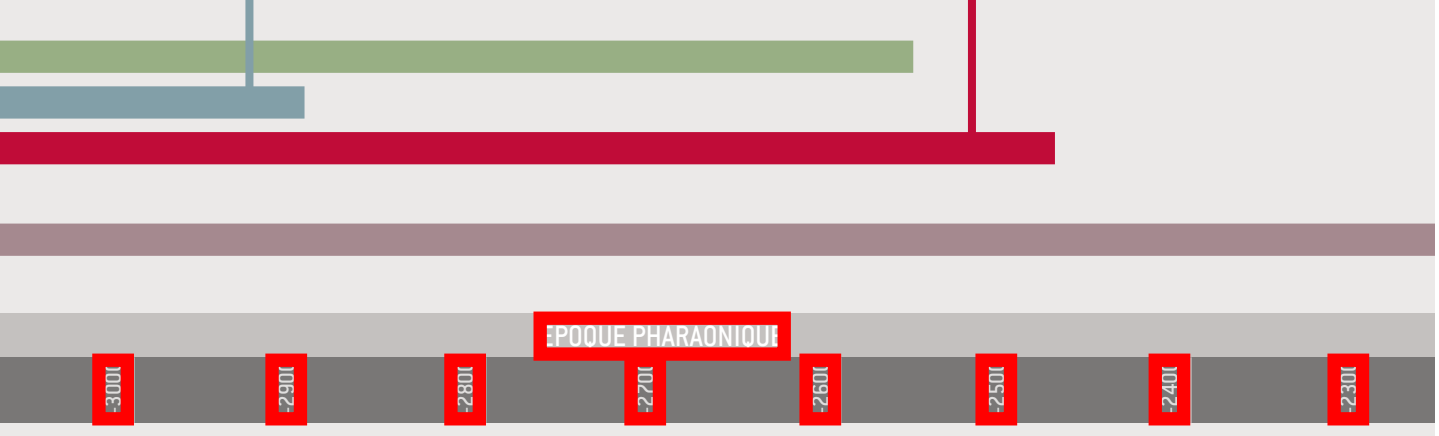
Le couple présent est l'élément dominant, qui détermine les éléments secondaires, choisis en fonction de règles d'association. Un bateau, une ligne ondulée (évoquant l'eau) ou des triangles pleins (figurant des montagnes) peuvent par exemple être associés aux deux couples.

L'AUTEUR

Gwenola GRAFF est chargée de recherche à l'IRD (Institut de recherche pour le développement) et membre de l'Unité mixte de recherche PALOC (Patrimoines locaux), IRD-Muséum national d'histoire naturelle.

2. CINQ SYSTÈMES GRAPHIQUES

ont existé dans l'Égypte antique. Le premier a été retrouvé gravé sur des roches *(en violet)* ; le deuxième peint sur des céramiques *(en orange foncé et clair)* ; le troisième gravé sur des sceaux, petits objets dont des empreintes étaient imprimées sur des tablettes d'argile ou des bouchons de jarre *(en rouge)* ; le quatrième incisé sur des vases *(en bleu)* ; et le cinquième tracé à l'encre *(en vert)*, également sur des vases. Ils avaient des fonctions différentes (comptables, rituelles, politiques ou funéraires).



3. ABYDOS EST L'ANCIENNE CAPITALE du royaume de Haute-Egypte. L'écriture y aurait été inventée vers 3250 avant notre ère par un groupe d'administrateurs royaux. La capitale a été plus tard transférée à Memphis, près du Caire, mais la ville est restée un important centre religieux dédié au dieu Osiris (*à gauche*, un temple construit par le pharaon Séthi I[er] et terminé par son fils Ramsès II au XIV[e] siècle avant notre ère).

En revanche, les ibex (un bouquetin) et les personnages masculins sont surtout associés au couple addax-femme.

Les scènes peintes sur les *C-Ware* figurent la chasse aux grands animaux aquatiques (hippopotame et crocodile), différents paysages (milieux semi-arides et steppiques, zones humides) ou des personnages masculins qui dominent d'autres groupes humains (scènes dites de victoire). Sur les *D-Ware* sont représentés des scènes de navigation, des défilés d'animaux (antilopes, gazelles ou autruches) et des rites de régénération. Ils traduisent une préoccupation des Égyptiens de cette époque pour le renouvellement de la vie après la mort, imaginé comme un retour du défunt vers une forme embryonnaire ; il reste dans cet état et évite ainsi un nouveau cycle de naissance et de mort. Plus tard, à l'époque pharaonique, l'âme du défunt peut aller se reposer dans une sorte de paradis, nommé les Champs d'Ialou, après avoir été jugée par le tribunal du dieu Osiris.

Des scènes évoquées et non racontées

Les vases peints évoquent ces conceptions et ces scènes, mais ne les décrivent pas en détail, comme le ferait une écriture. Celui qui observe le vase doit déjà les connaître pour les comprendre. Les éléments représentés lui permettent juste de s'en souvenir, puis de les recomposer avec ce qu'il sait. Les vases peints avec des scènes complexes disparaissent rapidement, environ un siècle avant l'apparition de l'écriture.

4. L'ÉCRITURE SE DISTINGUE des systèmes graphiques par son caractère phonétique : elle transcrit les sons d'une langue. Ainsi, ce hiéroglyphe représente une cigogne et un siège, qui se disent respectivement « ba » et « set » en égyptien ancien. Il désigne Basset, une ville antique. Il figure sur une étiquette de jarre découverte à Abydos et compte parmi les plus anciens connus.

Le troisième système graphique correspond aux *potmarks*, des marques incisées dans l'argile avant cuisson, sur la paroi externe des jarres. Apparus en Égypte dès le début du Néolithique, au VI[e] millénaire avant notre ère, ils se multiplient à partir de –3200 et disparaissent 300 ans plus tard.

Un *potmark* est constitué d'un signe seul ou de la combinaison de quelques signes, rarement plus de quatre. Les signes figurent des animaux, des parties du corps humain, des corps célestes, des outils, des éléments architecturaux ou des formes géométriques. On en connaît des centaines, voire des milliers. Certains deviendront des hiéroglyphes, d'autres non. Sur quelques *potmarks* postérieurs à l'invention de l'écriture, on trouve également des signes nommés *serekhs* : ce sont des représentations de la façade du palais royal, à l'intérieur desquelles est inscrit le nom du souverain régnant.

Des règles syntaxiques ?

Les combinaisons de signes semblent obéir à des règles d'association et d'exclusion. Selon Edwin Van den Brink, du Service israélien des antiquités, elles sont assimilables à une grammaire, définie comme un ensemble de règles codifiées et arbitraires s'appliquant à un système de signes. Je parlerais plutôt de syntaxe, préférant réserver le terme de grammaire à l'écriture. Quoi qu'il en soit, des travaux complémentaires sont nécessaires pour préciser ces règles.

On sait que les *potmarks* ont un rôle comptable, car ils figurent toujours sur des jarres contenant des denrées. Ils semblent avoir été utilisés par les administrations pour gérer les biens transitant sur de longues distances. Cependant, on ignore leur sens précis. Ils n'évoquent en tout cas ni le propriétaire, ni le contenu, ni la contenance, ni la provenance des jarres.

Parmi les cinq systèmes graphiques considérés ici, ceux figurant sur des sceaux sont les seuls à ne pas être d'origine égyptienne. Les sceaux sont de petits objets hauts de quelques centimètres, en pierre ou en ivoire, dont on se sert pour imprimer une empreinte sur une tablette d'argile ou un bouchon de jarre. Ils ont été élaborés en Mésopotamie, puis introduits en Égypte à la fin du IV[e] millénaire avant notre ère. Ils y ont été utilisés pendant près de 1 000 ans.

© Pour la Science - n° 432 - Octobre 2013

Dans la vallée du Nil, on a retrouvé assez peu de ces sceaux, mais beaucoup de tablettes affichant leur empreinte.

Les plus anciens sceaux égyptiens proviennent de la nécropole U d'Abydos, où ont aussi été retrouvés les premiers documents écrits. Ils portent une iconographie mésopotamienne. Aux environs de –3000, les Égyptiens se réapproprient l'image véhiculée par les sceaux et y représentent des thèmes qui leur sont propres.

Des récépissés pour les marchandises

À quoi servent les sceaux ? Leurs empreintes dans les plaquettes d'argile gardent trace et font office de récépissé pour des échanges de biens voyageant sur de longues distances, probablement avec plusieurs intermédiaires entre l'expéditeur et le destinataire. Ils indiquent qui sont ces derniers et valident les différentes étapes du transfert. Comme les *potmarks*, ils sont liés à l'essor des administrations royales (en Mésopotamie ou en Égypte) et au commerce de denrées précieuses (huile, textile, vin, etc.). Ainsi, des sceaux égyptiens ont été retrouvés en Nubie (un pays antique correspondant au Sud de l'Égypte et au Nord du Soudan actuels) et en Palestine, partenaires commerciaux du pays.

Notons que si les premiers sceaux donnent des indications sur le propriétaire ou le destinataire des denrées, ce ne sont pas pour autant des supports d'écriture : un roi-prêtre mésopotamien peut, par exemple, être représenté par une marque spécifique, telle une silhouette d'arbre ou d'animal. En revanche, les sceaux élaborés plus tardivement comprennent des inscriptions hiéroglyphiques, qui mentionnent parfois un nom ou un titre. Ainsi, des sceaux retrouvés à Gizeh portent les

Signes d'écriture

En comptant le nombre de signes d'une écriture, on peut déterminer de quel type elle est.

- **Moins de 40 signes : écriture alphabétique (un signe représente un son)**
- **De 40 à 100 signes : écriture syllabique (un signe représente une syllabe)**
- **Plusieurs centaines de signes : écriture logo-syllabique (un signe représente un mot complet ou une syllabe)**

L'écriture égyptienne ne provient pas de Mésopotamie

Les plus anciens écrits mésopotamiens sont des tablettes retrouvées dans le temple d'Eanna, à Uruk, datées de –3100. Il s'agissait des premières traces d'écriture connues, jusqu'à ce qu'on découvre la tombe du roi Scorpion, à Abydos, en 1986 : datés de –3250, les écrits qu'elle recelait ont fait reculer de plusieurs siècles notre idée de l'origine de l'écriture en Égypte.

L'écriture mésopotamienne *(à gauche)* est abstraite, tandis que l'écriture égyptienne est figurative *(à droite)*.

Une hypothèse classique attribuait alors une origine mésopotamienne à l'écriture égyptienne. Pourtant, tandis que cette dernière est héritée de systèmes graphiques complexes, l'écriture mésopotamienne a des précurseurs plus simples : les seuls connus sont les calculi (des jetons d'argile utilisés pour le comptage des têtes de bétail) et les sceaux. En outre, l'écriture égyptienne est restée figurative, alors que dans celle de Mésopotamie, la forme des signes s'est très vite écartée des éléments représentés : les signes sont devenus abstraits. L'écriture mésopotamienne est qualifiée de cunéiforme, du latin *cuneus* (clou), la forme des signes utilisés évoquant des clous et l'outil qui les imprime dans l'argile fraîche ressemblant à un clou.

Un autre argument contre l'hypothèse de l'origine mésopotamienne est qu'une écriture doit retranscrire les sons d'une langue, à laquelle elle est de ce fait intimement liée. Or l'égyptien ancien et le sumérien, la langue qu'encode l'écriture proto-cunéiforme et qui était parlée par la plus ancienne civilisation de Mésopotamie) sont deux langues très différentes, qui n'ont pas les mêmes sonorités. Il semble donc peu probable que les Égyptiens aient adapté un système créé pour une autre langue et peu approprié à la leur.

L'examen des systèmes numériques, qui alimentent une grande part des écrits retrouvés, confirme les différences. Les Sumériens utilisent des bases de numération 60 et 120 (et ponctuellement la base 10), selon ce qu'ils comptent. Par exemple, on compte en base 60 des textiles et des animaux vivants ou des humains de statut élevé, tandis que la base 10 sert pour les êtres vivants (humains ou animaux) de statut inférieur. Le système de mesures varie aussi en fonction des catégories d'objets pris en compte. Initialement, l'écriture cunéiforme disposait de 13 systèmes de mesures différents.

Le système de numération égyptien, lui, est de base 10. Il est unique, quel que soit l'objet dénombré. Les systèmes de mesures (surfaces, volumes, liquides, poids…) sont également standardisés. Le boisseau (en égyptien ancien *hequat*), par exemple, sert pour presque toutes les mesures de volumes ; il correspond à la contenance d'un seau d'une trentaine de litres, avec des variations de quelques litres selon les régions. Ces variations peuvent sembler étonnantes, mais, à titre de comparaison, les valeurs des unités en France n'ont été harmonisées que sous Louis XVI ! On utilise aussi des multiples décimaux de ces unités, à l'instar de nos grammes, kilogrammes, tonnes.

L'hypothèse d'une écriture héritée de la Mésopotamie n'est pas abandonnée pour autant – des découvertes futures pourraient faire reculer l'origine de l'écriture mésopotamienne, et des éléments ponctuels attestent de contacts entre les deux régions. Cependant, de plus en plus d'experts pensent que l'écriture a été inventée localement et de façon indépendante en Égypte. C'est probablement l'œuvre d'un petit groupe d'administrateurs royaux, à Abydos, la capitale de l'époque, peu avant –3250. L'étude des systèmes graphiques égyptiens confirme qu'ils étaient déjà engagés dans une évolution vers l'écriture.

5. CERTAINES REGLES DE COMPOSITION des vases décorés *(D-Ware)* ont été reprises dans les hiéroglyphes. La triple répétition d'un élément indique ainsi le pluriel, sur les *D-Ware (en haut à gauche, des autruches)* comme pour certains hiéroglyphes simples *(en haut à droite, des maisons)*. Autre exemple : le sens d'un élément central est précisé ou légèrement modifié par l'ajout de préfixes et de suffixes. Sur ce motif d'un *D-ware (au milieu)*, l'élément central évoque un rituel de régénération, et les éléments autour en précisent le contexte cérémoniel (bâtiments, animaux sacrifiés). De même, dans les hiéroglyphes *(en bas)*, les éléments secondaires *(en bleu)* introduisent diverses nuances, transformant par exemple « penser » en « réfléchir ».

noms des pharaons Kheops et Khephren, qui ont régné vers le milieu du III^e^ millénaire avant notre ère.

Le dernier des cinq systèmes graphiques consiste en des marques à l'encre ornant certaines céramiques retrouvées dans des tombes. Les plus anciennes (vers –3250) ont été découvertes sur des jarres de la tombe U-j, tandis que les plus récentes proviennent des galeries souterraines de la pyramide du pharaon Djoser, à Saqqara, datée de –2640. Elles ressemblent peu aux premiers hiéroglyphes, gravés sur les étiquettes d'une jarre de la même tombe. Les inscriptions sont très courtes, de un à quelques signes. Ces signes n'ont pas d'équivalent dans les autres systèmes graphiques et ne peuvent être lus phonétiquement. C'est un système d'annotation différent de l'écriture, et qui reste incompris.

Les cinq systèmes graphiques présentés ici sont très différents les uns des autres. Cela tient en partie à leurs usages variés : comptable pour les sceaux et les *potmarks* ; rituel, politique et funéraire pour les gravures rupestres, les vases décorés et les marques à l'encre) et à la façon dont les signes sont organisés. Quoi qu'il en soit, ceux qui précèdent l'écriture en introduisent certains aspects essentiels.

Pour les plus anciens, le support semble crucial : la forme tridimensionnelle de l'objet qui accueille la représentation joue un rôle dans le message. Les gravures rupestres intègrent parfois cette forme dans la scène.

SUR CERTAINES GRAVURES, des animaux sont représentés entrant ou sortant de fissures dans la roche, pour symboliser le passage d'un monde à l'autre

Ainsi, sur certaines gravures, des animaux sont représentés entrant ou sortant de fissures dans la roche, pour symboliser le passage d'un monde à l'autre.

Sur les vases peints, l'agencement des signes sur le support, leur emplacement (au-dessus d'un autre ou à un endroit plus ou moins visible) sont porteurs de sens. Certains vases sont aussi thériomorphes, c'est-à-dire en forme d'animaux : l'un d'eux a une forme d'hippopotame, et les harpons qui servaient à chasser l'animal sont peints dessus.

L'importance du relief du support diminue à la fin du IV^e^ millénaire. Cette évolution commence avec les *potmarks*, un peu avant l'écriture. L'objet devient alors une sorte de tableau en deux dimensions. Ce changement de statut permet au signe de s'affranchir : peu à peu, il est considéré comme un tout en soi et non comme une partie d'un ensemble qui comprend son support. Les signes sont placés les uns derrière les autres, en ligne, ou en petits groupes resserrés plus ou moins rectangulaires. Dans le cas des représentations sur des récipients (les *potmarks* et les marques à l'encre), ils n'occupent plus qu'une petite partie de la surface disponible.

En outre, les systèmes graphiques ont fourni des règles syntaxiques à l'écriture. Certaines règles des vases peints se retrouvent ainsi dans la grammaire hiéroglyphique *(voir la figure 5)*. Par exemple, sur les *D-ware* comme dans les hiéroglyphes, le pluriel s'exprime par la triple répétition d'un signe ; un dessin d'addax répété trois fois désigne ainsi « des addax », un pluriel indifférencié. Autre exemple : on modifie le sens d'un mot par l'ajout d'un préfixe ou d'un suffixe. Sur un vase peint, la scène évoquée est ainsi différente selon les éléments qui entourent l'élément central. De même, le hiéroglyphe *kaï* (penser) précédé du signe phonétique « ne » donne *nekaï*, signifiant réfléchir.

Les systèmes graphiques ne sont pas des écritures, car ils ne remplissent pas les critères énoncés précédemment : ils ne peuvent pas être compris sans un contexte culturel partagé et ils ne transcrivent pas les sons de la langue égyptienne. Cependant, les prémices de l'écriture y sont perceptibles. Certains de leurs signes sont à l'origine de hiéroglyphes, mais cela reste rare et la stylisation est assez différente. Leur héritage essentiel est ailleurs. Il est dans l'habitude d'enregistrer des informations avec des ensembles de signes codifiés par des règles et dans l'affranchissement de ces signes vis-à-vis du support.

Le dernier pas vers l'écriture

Vers –3250 se produit l'innovation déterminante qui marque la frontière avec l'écriture : l'acquisition d'un aspect phonétique. Les quelques centaines de plaquettes de la tombe U-j comportent 51 signes d'écriture différents. On y distingue des monolitères, des bilitères et des trilitères, c'est-à-dire des signes qui portent un nombre de phonèmes respectivement égal à un (A ou M par exemple), deux (KA, ST) ou trois (SAB, TCHR). Un lien avec le langage est ainsi créé. Dès lors, il n'est plus besoin de connaître à l'avance l'information enregistrée, ni le

© Pour la Science - n° 432 - Octobre 2013

contexte culturel : on ne se contente plus de se souvenir d'une histoire grâce à une représentation servant d'aide-mémoire, on lit un nouveau message.

De la liste de courses aux écrits religieux

Les déterminatifs, une autre catégorie majeure de signes de l'écriture hiéroglyphique, n'apparaissent que 300 ans plus tard, selon Ilona Regulski, de l'Université de Berlin. Ce sont des signes qui s'écrivent, mais ne se prononcent pas, et indiquent à quelle catégorie appartient le mot (objet en bois, animal, divinité, etc.). Ils permettent de préciser le message et de lever le doute en cas d'homophonie. Sans doute le vocabulaire écrit était-il si limité initialement qu'il n'y avait pas d'ambiguïté à lever.

Les premiers textes égyptiens et mésopotamiens comportent non seulement des mots, mais aussi des chiffres. Dans les deux cas, les inscriptions sont des enregistrements comptables. On dénombre d'abord des denrées, puis des surfaces, du temps de travail… Les textes tiennent plus de la liste de courses que de l'ode poétique !

À partir du III[e] millénaire avant notre ère, l'écriture se complexifie. Elle n'est plus un simple système graphique d'enregistrement de denrées, elle permet de transcrire le discours oral. C'est manifeste notamment dans les *Textes des pyramides*, les plus anciens écrits religieux connus, retrouvés dans les tombeaux des pharaons ayant régné de –2300 à –2100. Ils transcrivent des formules magiques censées guider et protéger le souverain dans son périple vers l'au-delà.

En Égypte, les débuts de l'écriture apparaissent donc comme ancrés dans une tradition graphique ancienne, riche et variée. Conçue au départ comme un outil supplétif à la mémoire ou permettant d'échanger des informations à distance, l'écriture n'a pas été une invention soudaine, surgie de nulle part. Elle n'en a pas moins connu un succès rapide et considérable à travers le monde, et modifié en profondeur le mode de vie des populations humaines. ■

BIBLIOGRAPHIE

G. Graff, **Construire l'image, ordonner le réel - Les vases peints du IV[e] millénaire en Égypte**, Errance, 2013.

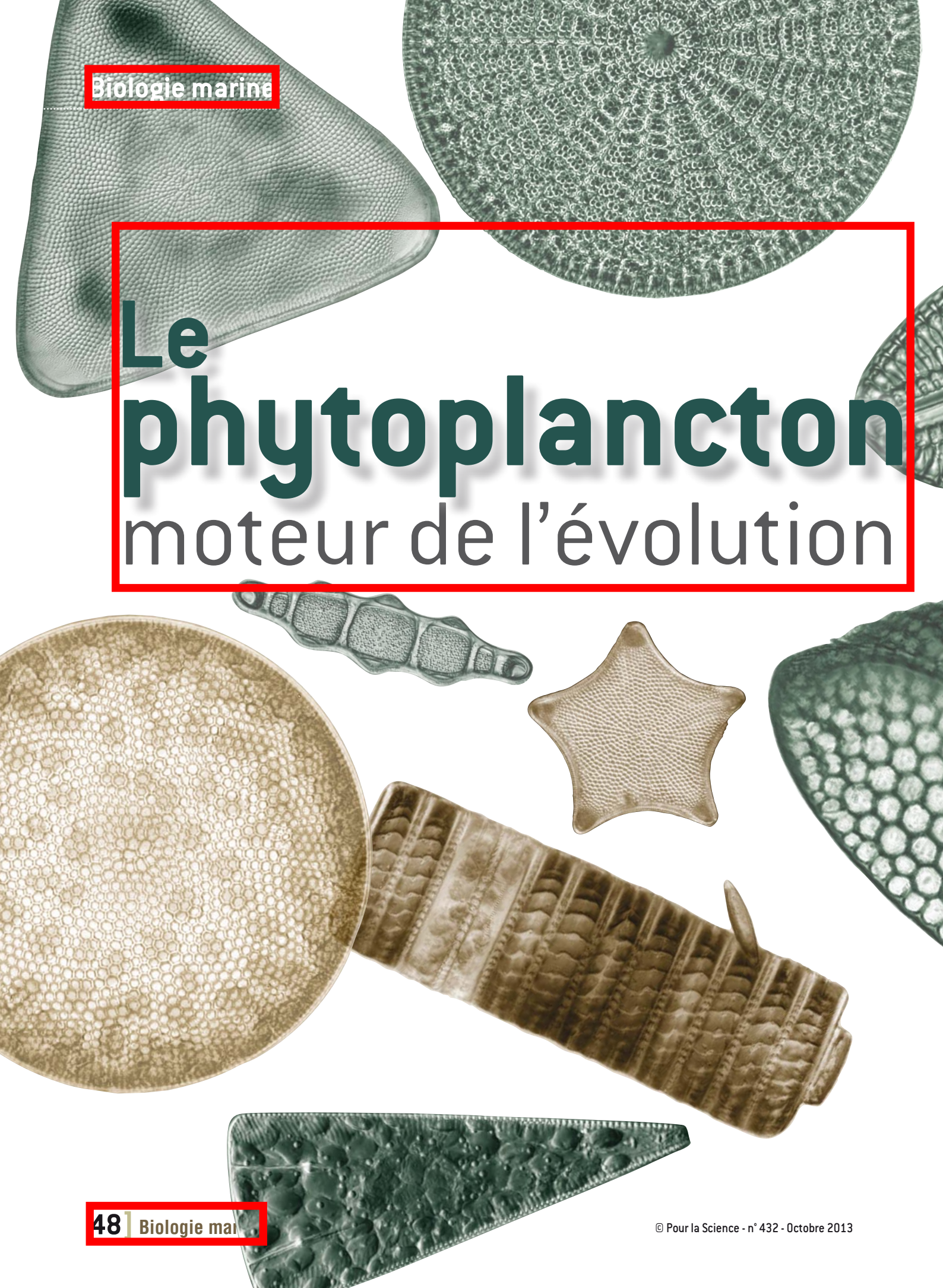
E. Teeter (éd.), **Before the Pyramids The Origins of Egyptian Civilization**, Oriental Institute Museum Publications, 2011.

C. Woods *et al.*, **Visible language Inventions of Writing in the Ancient Middle East and Beyond**, Oriental Institute Museum Publications, 2010. oi.uchicago.edu/pdf/oimp32.pdf

G. Graff, **Les peintures sur vases de Nagada I-Nagada II**, Presses Universitaires de Louvain, 2009.

C. Orgogozo, **Champollion. Comment il a déchiffré les hiéroglyphes**, *Les Génies de la science*, n°23, 2005.

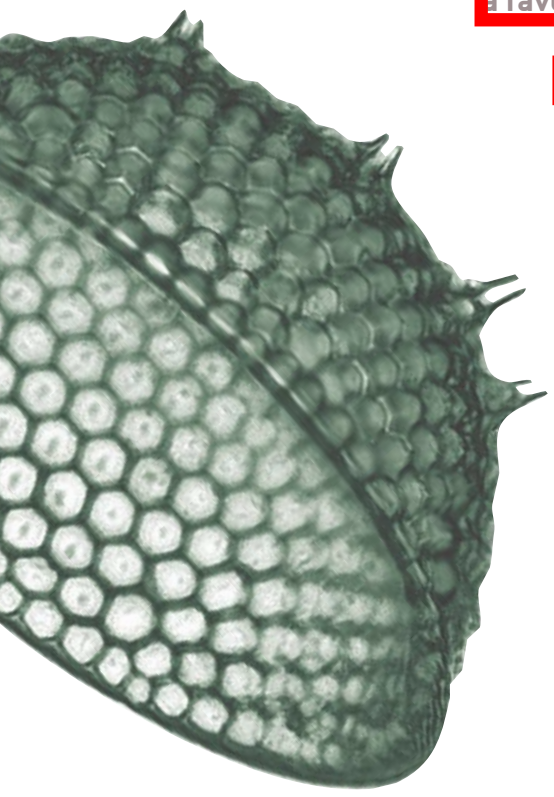
Le phytoplancton moteur de l'évolution

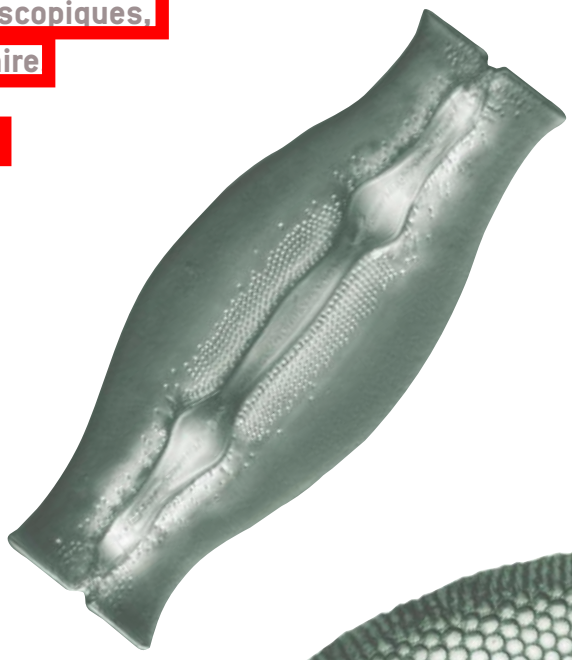


© Pour la Science - n° 432 - Octobre 2013

Il y a environ 250 millions d'années, les animaux marins se sont diversifiés rapidement. Le développement du phytoplancton, des végétaux microscopiques, a favorisé cet essor spectaculaire

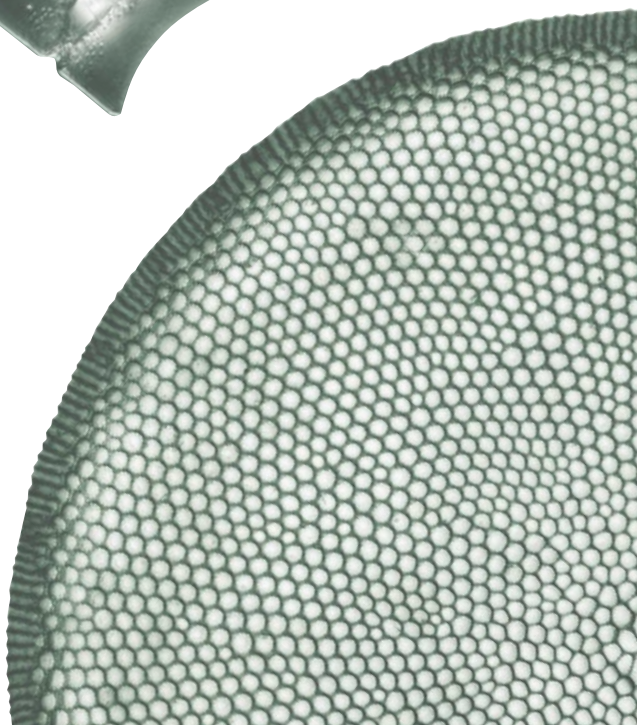
Ronald Martin et Antonietta Quigg





L'ESSENTIEL

- Après l'extinction massive des espèces marines survenue il y a 250 millions d'années, de nouvelles formes de vie très diverses se sont développées.
- Les biologistes ont attribué cette explosion évolutive à des facteurs physiques tels que le changement du niveau des mers.
- D'après plusieurs indices, le rôle du phytoplancton a été négligé. Son augmentation en quantité et en qualité nutritive aurait permis aux animaux marins modernes d'apparaître.



1. **DES DIATOMÉES** et d'autres organismes du phytoplancton de la lignée dite « rouge » ont commencé à remplacer le phytoplancton de la lignée « verte » il y a quelque 250 millions d'années.

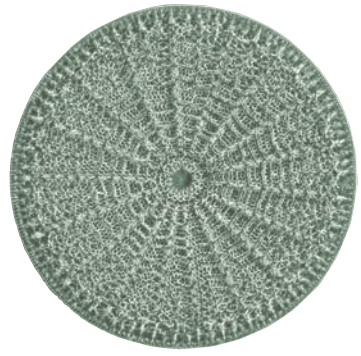
Si vous pouviez remonter le temps et visiter la Terre telle qu'elle était il y a 500 millions d'années, au Paléozoïque, vous ne reconnaîtriez pas votre planète. Les continents étaient, pour la plupart, concentrés dans l'hémisphère Sud ; les océans présentaient des configurations et des courants différents ; les Alpes et le Sahara n'étaient pas encore formés. Les plantes terrestres n'existaient pas. Une différence tout aussi notable concerne les animaux. La plupart des organismes multicellulaires vivaient en mer. Les maîtres des océans étaient les brachiopodes et les trilobites, des cousins disparus des crustacés et des insectes d'aujourd'hui, reconnaissables à leurs exosquelettes, leurs longues antennes et leurs yeux composés.

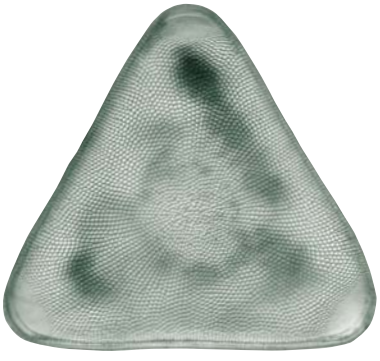
Après la crise, un boom des espèces

La diversité des animaux marins a augmenté progressivement jusqu'à l'extinction du Permien, il y a 250 millions d'années, qui a vu disparaître plus de 90 pour cent des espèces océaniques. Cela a mis fin à l'ère du Paléozoïque. Le vide laissé par cette catastrophe a entraîné une importante phase de réorganisation, au cours de laquelle s'est établie la domination de nouveaux groupes d'animaux, qui règnent aujourd'hui dans les mers. On retrouve, par exemple, les poissons prédateurs, les mollusques, les crustacés ou encore les oursins.

L'étude des fossiles présents dans les sédiments permet de recenser les espèces et d'estimer l'importance des différentes populations *(voir l'encadré page 51)*. Ces analyses montrent qu'au Mésozoïque et au Cénozoïque, les ères qui ont suivi le Paléozoïque, la vie marine s'est diversifiée à un rythme sans précédent.

Pour expliquer cet essor, les chercheurs ont d'abord pensé que les fossiles les plus anciens avaient disparu sous l'effet de l'érosion, ce qui donnait l'illusion d'une diversification importante. Mais des travaux ultérieurs ont indiqué que cet épanouissement apparent d'espèces marines a été bien réel. Afin d'expliquer le phénomène, les biologistes ont étudié divers facteurs, notamment les changements climatiques et les variations du niveau de la mer, ainsi que l'extinction de certaines espèces, susceptibles de créer de nouvelles opportunités de développement. Pourtant, bien que tous ces éléments aient pu contribuer à la diversification amorcée il y a 250 millions d'années, ils ne peuvent à eux seuls être responsables de l'explosion évolutive observée.





Un autre facteur a été sous-estimé : la nourriture disponible sous forme de plantes microscopiques, le phytoplancton. L'étude des fossiles montre que le phytoplancton a connu, après la crise du Permien, une augmentation en quantité et en diversité. Les espèces se nourrissant de phytoplancton y ont trouvé d'abondants nutriments. Ainsi, le développement de ces végétaux microscopiques a accompagné la spectaculaire émergence de nouvelles créatures marines au Mésozoïque et au Cénozoïque.

Selon nous, l'évolution de ces plantes microscopiques, qui sont à la base de la chaîne alimentaire marine, a été le moteur du développement de la faune marine moderne. En outre, cette compréhension nouvelle de la façon dont le phytoplancton a transformé la vie dans les mers anciennes ouvre des pistes de réflexion sur l'avenir des océans actuels. Le phytoplancton reste un élément clé de la chaîne alimentaire ; mais qu'adviendra-t-il si les changements climatiques perturbent leur prolifération, comme ils ont déjà commencé à le faire ?

Source d'énergie

Comment le phytoplancton a-t-il joué un rôle crucial dans l'évolution des animaux marins ? Comme toutes les plantes, le phytoplancton exploite l'énergie du Soleil pour fabriquer de la matière organique grâce à la photosynthèse. De minuscules organismes herbivores dérivants – le zooplancton – se nourrissent du phytoplancton et sont à leur tour mangés par des prédateurs situés plus haut dans la chaîne alimentaire. L'azote, le fer, le phosphore et d'autres nutriments présents dans l'eau stimulent la croissance du phytoplancton. Plus ces nutriments sont disponibles, plus le phytoplancton croît et plus le zooplancton s'en nourrit et prolifère.

Non seulement le phytoplancton est plus abondant, il est aussi plus nutritif pour le zooplancton. Ces micro-organismes se développent et se reproduisent alors plus efficacement. Leurs populations augmentant, ils se dispersent et conquièrent de nouveaux territoires. Certaines populations se retrouvent isolées de leurs populations

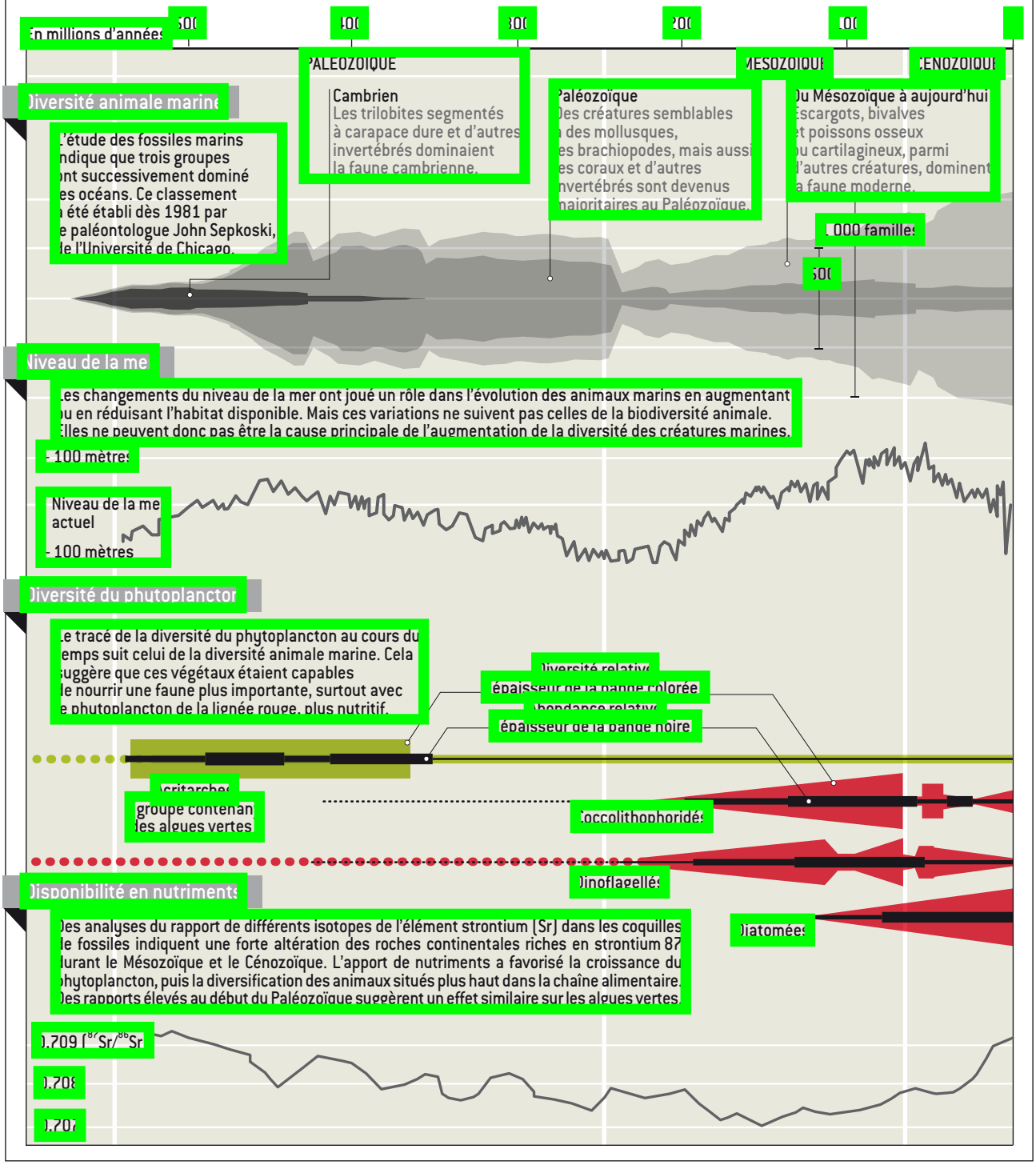
© Pour la Science - n° 432 - Octobre 2013

L'EFFET DU PHYTOPLANCTON

L'extinction massive qui marque la fin du Paléozoïque, il y a environ 250 millions d'années, a concerné plus de 90 pour cent des espèces marines (et 70 pour cent des espèces terrestres). Parmi les scénarios proposés pour expliquer cette crise, un volcanisme important – avec la formation de trapps en Sibérie, de vastes plateaux de basalte – a pu altérer le climat.

À la suite de cette crise, durant le Mésozoïque et le Cénozoïque, les animaux marins ont connu une forte diversification, atteignant un nombre d'espèces bien plus élevé qu'auparavant. Les scientifiques ont d'abord attribué cette explosion à des facteurs physiques, tel le changement du niveau de la mer. Mais l'évolution du phytoplancton – les minuscules végétaux qui forment la base de la chaîne alimentaire marine – aurait joué un rôle important dans cet essor.

L'érosion continentale aurait fourni les éléments nécessaires au développement du phytoplancton, qui s'est multiplié et est devenu plus riche en nutriments. Le phytoplancton a ensuite nourri les autres espèces.



La première révolution du planctor

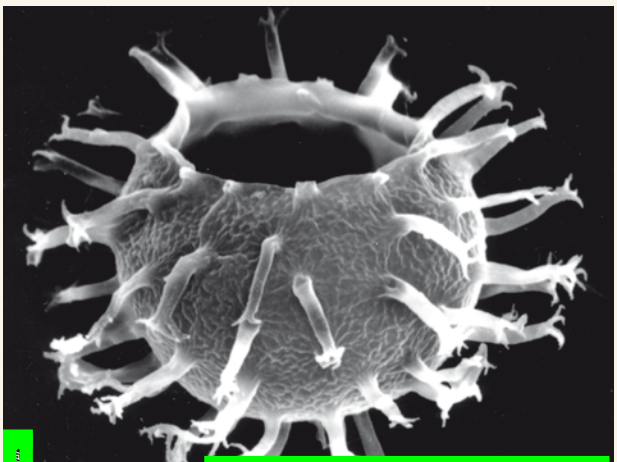
L'étude de l'évolution du phytoplanc
ton se heurte à de nombreuses diffi
cultés : définir précisément les différents groupes de phytoplancton et retrouver leurs traces. Il est toutefois possible de remonter jusqu'au Paléozoïque et même de montrer qu'une autre révolution planctonique a eu lieu bien avant celle du Mésozoïque évoquée par Ronald Martin et Antonietta Quigg.

Le phytoplancton dans les océans actuels est formé de trois principaux groupes : les coccolithophoridés (avec une coquille en carbonate de calcium), les diatomées (avec des valves en silice) et les dinoflagellés (produisant des kystes en matière organique). L'analyse des fossiles permet de suivre leur évolution, mais seule une petite partie du phytoplancton est fossilisée. Martin Head, de l'Université de Brock, au Canada, et ses collègues ont ainsi estimé que seuls 17 pour cent des espèces actuelles de dinoflagellés fossilisent.

Peut-on savoir si ces trois groupes ont existé au Paléozoïque ? Cela pourrait être le cas des coccolithophoridés et des dinoflagellés. Ces derniers sécrètent, par exemple, une substance qui leur est spécifique et que l'on retrouve dans les sédiments du début du Paléozoïque.

Mais ces trois groupes de phytoplancton ne sont pas les seuls à jouer un rôle important. Le picoplancton se distingue par sa taille, inférieure à deux micromètres. Il est surtout constitué de bactéries – on parle aussi de bactérioplancton. L'enregistrement fossile de ce groupe est quasi inexistant. Même son rôle aujourd'hui dans les océans est mal connu. Pour certains chercheurs, il représenterait une masse de matière organique supérieure à celle des autres groupes.

Les trois groupes majeurs du phytoplancton moderne ne sont pas présents dans les sédiments antérieurs à l'extinction de la fin du Paléozoïque (aussi nommée extinction du Permien-Trias). Pourtant, le phytoplancton est bien présent au Paléozoïque sous d'autres formes, notamment d'acritarches, qui sont, avec leurs kystes en matière organique, les précurseurs en quelque sorte des dinoflagellés. Ces acritarches ont eu au Paléozoïque un rôle équivalent à celui du phytoplancton moderne au Mésozoïque et au Cénozoïque. Au Cambrien et à l'Ordovicien, ils se sont



Acritarche de 50 micromètres de diamètre, datant de 480 millions d'années

massivement diversifiés et ont servi de nourriture aux nouveaux groupes de zooplancton apparus à la fin du Cambrien (graptolites, chitinozoaires, radiolaires, foraminifères).

La vie s'est diversifiée rapidement pour atteindre ses plus hauts niveaux de diversité au Paléozoïque moyen. Ce phénomène a été encouragé par des niveaux marins élevés recouvrant des plates-formes continentales peu profondes, milieu propice au développement des organismes. On parle ainsi de la première « révolution du plancton ».

Il reste à rechercher la présence du phytoplancton calcaire et siliceux au Paléozoïque et à comprendre, notamment avec des méthodes de biomarqueurs, l'importance du bactérioplancton durant les époques géologiques lointaines.

Thomas Servais
UMR Géosystèmes,
CNRS-Université de Lille1

originelles, ce qui, par le jeu des mutations et de la sélection naturelle, conduit à la formation de nouvelles espèces.

L'un des premiers indices qu'une forte hausse de l'abondance en phytoplancton a pu être partiellement responsable de l'explosion biologique après le Paléozoïque est apparu dans les années 1990. Des chercheurs, dont Richard Bambach, aujourd'hui à l'Institut Smithsonian, et l'un de nous (R. Martin), déduisirent à partir de l'analyse de fossiles d'animaux marins que la disponibilité en nourriture a nécessairement augmenté entre le Paléozoïque et le Cénozoïque. Cette conclusion reposait sur la constatation que les prédateurs et les autres espèces, qui consomment plus d'énergie que le zooplancton, ont représenté une proportion de plus en plus importante de la vie marine au fil du temps. Plus récemment, avec Victor Podkovyrov de l'Académie russe des sciences, nous avons trouvé des signes qui confortent cette hypothèse en observant des fossiles de plancton marin.

Nous avons montré qu'au Paléozoïque, un certain type de phytoplancton – les « algues vertes » – formait la base de la chaîne alimentaire marine, et que les prédateurs étaient relativement rares. Mais après que l'extinction massive du Permien a éradiqué l'essentiel des organismes marins, y compris la plupart des algues vertes, de nouvelles sortes de phytoplancton sont apparues, à commencer par les coccolithophoridés, ainsi nommés pour leur coquille en carbonate de calcium, ou « coccolithe », qu'ils sécrètent probablement pour se protéger. Ces organismes végétaux ont été bientôt rejoints par les dinoflagellés et les diatomées, qui allaient former le phytoplancton le plus varié et le plus abondant. Ces trois groupes – réunis sous le terme d'algues rouges, à cause du type de chlorophylle qu'ils utilisent lors de la photosynthèse – ont en grande partie remplacé les algues vertes du Paléozoïque, devenant ainsi la nouvelle ressource alimentaire du milieu marin.

Pourquoi les algues rouges ont-elles pris l'ascendant sur les formes vertes qui avaient survécu à l'extinction de la fin du Permien ? Des changements dans la disponibilité de micronutriments (des nutriments disponibles en faibles concentrations) utilisés dans la photosynthèse semblent avoir joué un rôle important.

Vert contre rouge

L'un de nous (A. Quigg) et ses collègues à l'Université Rutgers, aux États-Unis, ont analysé le contenu en micronutriments des algues vertes et rouges actuelles. Ils ont montré que les algues vertes ont de plus fortes concentrations en fer, zinc et cuivre que leurs homologues rouges. Ces dernières présentent de plus grandes quantités de manganèse, cobalt et cadmium. Ces différences suggèrent que, suivant les abondances des différents micronutriments, un type de phytoplancton s'est développé plus que l'autre.

© Pour la Science - n° 432 - Octobre 2013

L'étude géologique corrobore cette hypothèse. La profusion de roches riches en matière organique – du schiste noir – datant du Paléozoïque indique que les concentrations d'oxygène dans les océans devaient être faibles à cette époque ; en effet, l'exposition à des concentrations d'oxygène plus élevées aurait causé la décomposition de la matière organique. Dans ces conditions, le fer et les autres micronutriments grâce auxquels les algues vertes se sont épanouies se seraient dissous plus facilement dans l'océan et auraient été facilement disponibles pour la photosynthèse.

Les schistes noirs du Mésozoïque sont en revanche plus rares. Cela implique que, dans l'ensemble, les concentrations d'oxygène étaient alors bien plus élevées. Ces conditions auraient aidé les micronutriments utilisés par le phytoplancton de lignée rouge à demeurer dissous dans les océans et consommable.

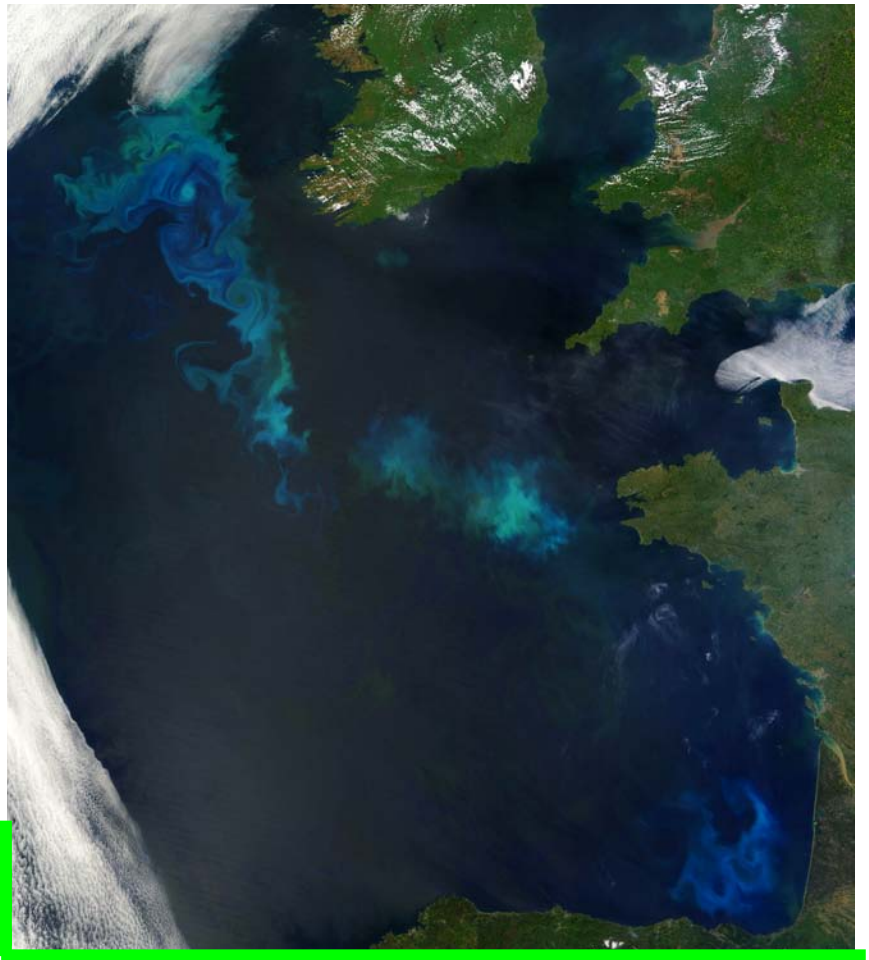
La part de l'érosion

Mais les changements de concentration des micronutriments durant le Mésozoïque n'expliquent pas à eux seuls le développement important du phytoplancton, et en particulier des algues rouges. Nous avons envisagé que les changements de disponibilité en macronutriments (éléments nutritifs disponibles en plus fortes concentrations), tels que le phosphore, ont aussi contribué au succès de ces groupes. Et ces macronutriments, utilisés par le phytoplancton dans des processus biochimiques fondamentaux tels que la synthèse de l'ADN, semblent avoir gagné les océans à partir d'événements qui ont eu lieu sur la terre ferme.

Vers la fin du Paléozoïque et au Mésozoïque, les forêts se sont étendues sur les continents et le climat a commencé à se faire plus humide, augmentant les phénomènes d'érosion sur les continents. L'altération physique et chimique résultant du processus de fragilisation des sols par les racines, de la décomposition des feuilles mortes et de la formation d'humus a augmenté. Cela aurait favorisé le ruissellement d'éléments nutritifs du sol et de détritus végétaux dans les bras de mer peu profonds où le plancton prospérait. L'émergence des plantes à fleurs, au cours du Mésozoïque, aurait renforcé le ruissellement de nutriments, parce que leurs feuilles mortes se décomposent plus rapidement que celles des conifères, cycas et autres arbres qui formaient les premières forêts.

Des preuves de l'érosion continentale proviennent d'analyses du rapport des concentrations des différents isotopes de l'élément strontium contenus dans les coquillages fossiles *(voir l'encadré page 51)*. Les roches continentales sont plus riches en strontium 87 que les roches océaniques. Comme on observe dans les coquillages fossiles une augmentation du rapport strontium 87/strontium 86 au cours du temps, il semble que les éléments nutritifs étaient transportés des terres vers les océans en quantités de plus en plus grandes, comme on s'y attendrait en cas d'érosion continentale. Des études isotopiques similaires conduites sur un autre élément, le lithium, confirment la tendance.

Les études isotopiques confirment non seulement l'existence de tels flux en provenance des terres, mais ont aussi appuyé l'idée – proposée pour la première fois par l'un de nous (R. Martin) en 1996 – que le ruissellement d'éléments nutritifs issus de l'altération continentale pourrait augmenter la biodiversité du phytoplancton et des animaux qui s'en nourrissent. Si la contribution de nutriments en provenance des terres jouait un rôle dans la diversification du plancton et des créatures pendant le Mésozoïque et le Cénozoïque, on pourrait s'attendre à ce que l'augmentation du rapport strontium 87/strontium 86 dans les coquilles soit parallèle à l'augmentation de la diversité d'espèces marines. Cela a été confirmé en 2010 par les travaux de John Alroy, de l'Université de Macquarie en Australie. Une autre étude, publiée la même année par Andrés Cárdenas et Peter Harries, de l'Université de Floride du Sud, montre une corrélation similaire.



2. UNE EFFLORESCENCE ALGALE se propage dans l'Atlantique en mai 2010. Ce phénomène est fréquent au printemps ; il est donc difficile de savoir si les retombées de cendres riches en nutriments du volcan islandais Eyjafjallajökull ont eu un rôle dans la prolifération du phytoplancton. Cependant, en 2008, l'éruption du volcan Kasotochi, dans le Pacifique, a provoqué une efflorescence en apportant du fer au phytoplancton dans une mer pauvre en cet élément.

Des niveaux d'oxygène plus élevés dans les océans et le développement des forêts et des plantes à fleurs n'auraient pas été les seuls facteurs renforçant la disponibilité d'éléments nutritifs pour le phytoplancton. La formation de montagnes lors des collisions de plaques continentales (qui ont conduit à la formation du supercontinent Pangée) expose plus de roches à l'érosion. Ce phénomène, ajouté à la baisse du niveau des océans, se serait traduit, avant le Mésozoïque, par une hausse de l'érosion des terres et le ruissellement de nutriments vers les mers. Le cycle de l'eau a aussi été influencé par la présence des glaciers continentaux qui occupaient l'hémisphère Sud durant la plus grande partie du Paléozoïque tardif. Les glaciers ont refroidi l'eau qui, devenant plus dense, s'enfonce au fond. Cela a entraîné une circulation rapide de l'eau et l'oxygénation des océans. Cet effet d'oxygénation a aussi eu lieu dans les remontées d'eaux profondes riches en phosphore provenant de la décomposition de matière organique.

L'ensemble de ces facteurs aurait créé les conditions favorables permettant au phytoplancton de lignée rouge de prospérer, lui fournissant les micronutriments et les macronutriments dont il avait besoin pour se développer.

Le règne des algues vertes pauvres en nutriments durant la première moitié du Paléozoïque semble avoir limité l'évolution des animaux marins, retardant l'apparition de nouvelles formes de vie au métabolisme plus élevé. Mais lorsque le phytoplancton riche en nutriments a pris une place centrale, les animaux marins qui s'en nourrissaient ont connu une diversification rapide, comme le montre l'étude des fossiles. De nouveaux groupes de poissons prédateurs sont entrés en scène, avec, entre autres, de nouvelles variétés de mollusques, crustacés, coraux et bivalves.

Deux expériences de terrain récentes offrent une preuve de principe que l'apport d'éléments nutritifs que nous avons décrit pourrait avoir suscité la diversification d'animaux multicellulaires. Dans la première, Tron Frede Thingstad, de l'Université de Bergen, en Norvège, et ses collègues ont ajouté du phosphore à des eaux de surface de la Méditerranée orientale, qui sont naturellement très pauvres en nutriments, et particulièrement en phosphore. Ces eaux présentent des conditions qui ressemblent à celles ayant existé au début du Paléozoïque. L'introduction de nutriments a stimulé une rapide absorption du phosphore par le phytoplancton local – bien plus que nécessaire pour une croissance normale. Le contenu en nutriments de ces minuscules végétaux s'est enrichi en un peu plus d'une semaine.

Lors de la seconde expérience, James Elser, de l'Université d'État de l'Arizona, a fourni du phosphore à des communautés de cyanobactéries dans le courant marin de Coahuila, au Mexique. Ces cyanobactéries procèdent à la photosynthèse comme le font les plantes pour se développer. Elles sont similaires à des cyanobactéries qui vivaient durant le début du Paléozoïque. L'excédent de phosphore a provoqué un développement important des cyanobactéries, avec une hausse totale de la masse de matière organique. En outre, les escargots qui se nourrissent de ces cyanobactéries en ont bénéficié et leurs effectifs ont nettement augmenté.

Bien que ces expériences n'aient pas démontré de diversification des espèces (leur durée est trop courte), elles montrent que la hausse en disponibilité de nutriments clefs dans les mers a pu accroître rapidement le contenu en nutriments du phytoplancton et que celui-ci pourrait avoir très vite transmis ces bénéfices vers le haut de la chaîne alimentaire à des animaux qui s'en nourrissaient. Ces derniers ont alors consacré plus d'énergie à la reproduction, prérequis à la diversification.

Un retour vers le Paléozoïque

Comprendre comment le phytoplancton réagissait à des conditions environnementales changeantes dans le passé pourrait aider les chercheurs à prévoir quel futur est réservé à la vie marine actuelle. Le dioxyde de carbone émis par les activités humaines réchauffe la planète et acidifie les océans. Dans les siècles à venir, les océans ressembleront, dans une certaine mesure, à ceux du Mésozoïque et du Paléozoïque. Ces modifications perturberont l'équilibre des populations de phytoplancton.

Dans l'océan profond, d'épais dépôts riches en carbonate de calcium, qui se sont formés par l'accumulation de coquilles de coccolithophoridés, auront tendance à neutraliser le dioxyde de carbone dissous. Mais dans les eaux de surface, les coccolithophoridés et d'autres organismes à éléments calcaires pourraient être menacés

LES AUTEURS

Ronald MARTIN est professeur de géologie à l'Université du Delaware, aux États-Unis.

Antonietta QUIGG est professeur de biologie marine à l'Université A&M du Texas à Galveston.

BIBLIOGRAPHIE

R. Martin et A. Quigg, **Evolving phytoplankton stoichiometry fueled diversification of the marine biosphere,** *Geosciences*, vol. 2(2), pp. 130-146, 2012.

B. Langmann *et al.*, **Volcanic ash as fertiliser for the surface ocean,** *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 10, pp. 3891-3899, 2010.

C. Servais *et al.*, **Understanding the great Ordovician biodiversity event : influence of paleogeography, paleoclimate, or paleoecology ?,** *GSA Today*, vol. 19, n° 4/5, 2009.

C. Servais *et al.*, **The Ordovician biodiversification : revolution in the oceanic trophic chain,** *Lethaia*, vol. 41, pp. 99-109, 2008.

par l'acidification, qui réduit considérablement la disponibilité des minéraux nécessaires à leurs coquilles. Bien que de tels organismes aient enduré des changements environnementaux durant des centaines de millions d'années, l'augmentation du dioxyde de carbone est aujourd'hui si importante qu'ils ne seront peut-être pas capables de s'y adapter assez rapidement.

La perte de ces organismes renforcerait le réchauffement. Aujourd'hui, les efflorescences du coccolithophoridé *Emiliania huxleyi* peuvent couvrir des surfaces supérieures à 100 000 kilomètres carrés *(voir la figure 2)*. Elles produisent des quantités notables de sulfure de diméthyle qui, passé dans l'atmosphère, déclenche la formation de nuages. Ces derniers, en réfléchissant la lumière du Soleil vers l'espace, refroidissent la planète. Sans les coccolithophoridés, la Terre absorberait plus d'énergie solaire qu'elle ne le fait déjà.

Le phytoplancton calcifiant qui se développe au sein des récifs sera doublement pénalisé par le dioxyde de carbone anthropogénique. Non seulement l'eau acidifiée pourrait dissoudre leur squelette, mais le réchauffement de l'eau risque de dépasser leur seuil de tolérance et de les faire disparaître.

Des bouleversements à venir ?

Les émissions de dioxyde de carbone ne sont pas la seule menace que les hommes font peser sur le phytoplancton. L'érosion des sols due à la déforestation et d'autres activités humaines inonde les systèmes côtiers d'éléments nutritifs, conduisant à un développement excessif et à une décomposition importante de végétaux marins. L'équilibre actuel des récifs pourrait s'effondrer et mettre en péril la biodiversité.

En se réchauffant, les océans pourraient se stratifier de plus en plus : l'eau chaude en surface agit comme un couvercle sur l'eau froide, entravant ainsi les courants verticaux et la circulation de l'eau. Ces conditions favorisent les dinoflagellés et risquent d'augmenter les efflorescences toxiques dans les milieux côtiers.

L'étude des bouleversements du passé montre que l'équilibre des populations de phytoplancton est assez fragile et que les changements ont eu des répercussions importantes. Aujourd'hui, des chercheurs étudient, par exemple, les conséquences de la baisse d'oxygénation de l'eau dans le delta du Mississippi ou certains lacs sur le phytoplancton et, *via* un effet de domino, sur les animaux qui s'en nourrissent.

De tels travaux pourraient aider à mieux prévoir comment le phytoplancton et les espèces qui en dépendent se comporteront dans le futur. Ceux qui nient le changement climatique affirment souvent que la vie s'est régulièrement adaptée aux changements environnementaux dans le passé et qu'elle peut ainsi supporter de futures fluctuations ; cette façon de penser est inappropriée. Les activités humaines modifient les conditions océaniques à une vitesse inégalée dans l'histoire de la planète. Nous sommes donc malgré nous en train de mener une expérience inédite, dont l'issue ne sera pas connue avant qu'elle n'arrive à son terme. ■

Particules et champs sont-ils RÉELS ?

Les physiciens nous présentent un monde constitué de particules et de champs de force. Mais ces notions posent d'importantes difficultés d'interprétation. D'après certains chercheurs, le monde serait plutôt fait de propriétés, telles que la couleur ou la forme

Meinard Kuhlmann

Les physiciens qui étudient la matière dans ses aspects les plus fondamentaux décrivent souvent l'Univers comme étant constitué de minuscules particules, plus petites que les atomes, qui s'attirent et se repoussent par l'intermédiaire de champs de force. Ils nomment « physique des particules » leur domaine de recherche et « accélérateurs de particules » ou « détecteurs de particules » leurs instruments. Ils se conforment à un modèle du monde rappelant les constructions d'un jeu de Lego. Mais cette vision passe sous silence un fait méconnu : en physique quantique, les notions de particule et de champ sont tellement distordues par rapport aux notions classiques que beaucoup pensent que le monde pourrait être formé de quelque chose d'entièrement différent.

Le problème n'est pas que les physiciens ne disposeraient pas de théorie valable du monde subatomique. Ils en ont une : la théorie quantique des champs. Les physiciens l'ont élaborée entre la fin des années 1920 et le début des années 1950, en cherchant à marier la mécanique quantique avec la théorie de la relativité restreinte d'Einstein. La théorie quantique des champs fournit les fondements conceptuels du modèle standard de la physique des particules, qui décrit dans un cadre commun les constituants de la matière et trois de leurs quatre interactions fondamentales. En termes de précision empirique, c'est la théorie qui a été le plus couronnée de succès de toute l'histoire de la science. Les physiciens s'en servent quotidiennement pour calculer les résultats des collisions de particules, la synthèse des éléments au cours du Big Bang, les conditions extrêmes à l'intérieur des noyaux atomiques et bien d'autres choses encore.

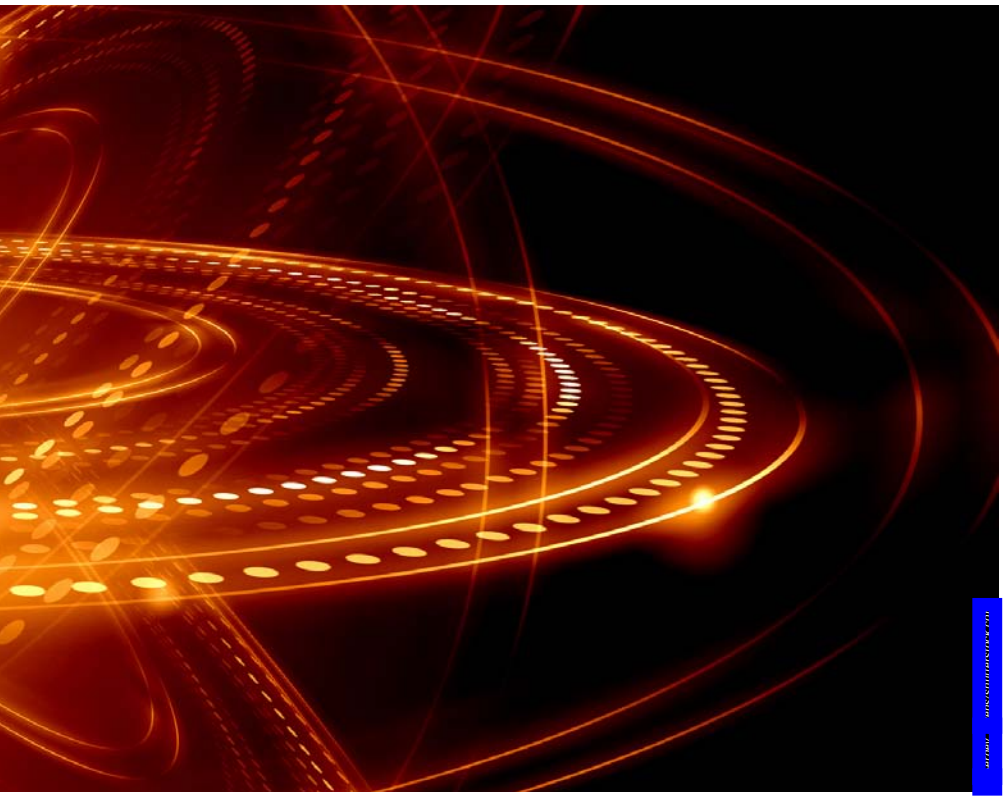
Dans ces conditions, il peut paraître surprenant que les physiciens ne soient même pas sûrs du tableau fondamental et des concepts premiers que dépeint la théorie, autrement dit de son « ontologie ». Cet embarras est distinct des mystères largement débattus de la mécanique quantique tel celui de savoir si un chat, dont le sort dépend d'une fiole de poison actionnée par un dispositif quantique, peut être à la fois mort et vivant).

Le fait que l'interprétation de la théorie quantique des champs soit une question non encore réglée entrave les progrès de ceux qui cherchent à sonder la physique au-delà du modèle standard de la physique des particules : il est risqué de formuler une

L'ESSENTIEL

- On imagine souvent les particules élémentaires comme de petites billes. Mais cette image perd son sens en physique quantique.
- Selon de nombreux physiciens, les particules ne sont pas des objets, mais des excitations d'un champ quantique. Toutefois, cette notion soulève elle aussi les difficultés.
- Pour surmonter ces obstacles conceptuels, certains pensent que le monde n'est pas formé d'entités matérielles, mais de relations ou de propriétés telles que la masse, la charge et le spin.

© Pour la Science - n° 432 - Octobre 2013



nouvelle théorie quand on ne comprend pas bien celle que l'on a déjà !

Au premier abord, le contenu du modèle standard semble évident. Il comporte en premier lieu des groupes de particules élémentaires, tels les quarks et les électrons, et en second lieu quatre types de champs de force, qui sont les médiateurs des interactions de ces particules. C'est le tableau que l'on voit sur les murs des salles de cours et dans des articles de *Pour la Science*. Mais il a beau être convaincant, il est très insatisfaisant.

Pour commencer, les deux catégories d'objets, particules et champs, se brouillent. La théorie quantique des champs associe un champ à chaque type de particule élémentaire, si bien qu'il existe un champ électronique pour l'électron, un champ pour chaque type de quark, etc. En même temps, les champs de force ont eux aussi des particules associées. Par exemple, le photon est la particule associée au champ électromagnétique.

Ainsi, la distinction entre particules et champs semble artificielle, et dans le discours des physiciens, l'un ou l'autre ressort comme étant plus fondamental. Ce point a été beaucoup débattu : la théorie quantique des champs concerne-t-elle en fin de compte les particules ou les champs ? Dès le départ, il y eut d'éminents physiciens et philosophes dans chaque camp. Même aujourd'hui, ces deux concepts sont encore utilisés à des fins d'illustration, bien que la plupart des physiciens admettent que les notions classiques de particule ou de champ ne correspondent pas à ce que décrit la théorie. Si les images mentales évoquées par les mots « particule » et « champ » ne correspondent pas à ce que décrit la théorie quantique des champs, les physiciens et les philosophes doivent trouver par quoi les remplacer.

Les deux options classiques conduisant à une impasse, certains philosophes et physiciens ont formulé des alternatives plus radicales. Ils suggèrent que les constituants les plus fondamentaux du monde matériel sont des entités intangibles telles que des relations et des propriétés. Une idée particulièrement radicale consiste à affirmer que tout se réduirait à des entités intangibles et à rien d'autre, sans aucune référence à des objets. C'est une idée révolutionnaire et contre-intuitive, mais certains soutiennent que la physique nous l'impose.

Quand la plupart des gens, experts compris, se représentent la réalité subatomique, ils imaginent des particules qui se comportent comme de petites boules de billard rebondissant les unes sur les autres. Mais cette notion de particules est le prolongement d'une vision du monde qui remonte aux philosophes atomistes de la Grèce antique et qui a atteint son apogée dans les théories d'Isaac Newton. Plusieurs raisonnements montrent que les unités fondamentales de la théorie quantique des champs ne se comportent pas du tout comme des boules de billard.

Tout d'abord, le concept classique de particule sous-entend un objet qui existe en un lieu précis. Mais les « particules » de la théorie quantique des champs n'ont en général pas de position bien définie. Par exemple, une particule de votre corps n'est pas strictement localisée à l'intérieur de votre corps. Un observateur qui tenterait de mesurer sa position a une probabilité faible, mais non nulle, de la détecter dans les endroits les plus lointains de l'Univers. Cette contradiction était déjà évidente dans les premières formulations de la mécanique quantique, mais elle a empiré quand les théoriciens ont fusionné la mécanique quantique avec la théorie de la relativité restreinte. Les particules quantiques relativistes sont très insaisissables : elles ne se trouvent dans aucune région particulière de l'Univers !

Des particules problématiques

Ensuite, supposons qu'une particule soit localisée dans votre cuisine. Votre ami, qui regarde votre logement en passant devant en voiture, pourrait voir cette particule étalée sur l'Univers entier. Ce qui est localisé pour vous est délocalisé aux yeux de votre ami. Non seulement la position de la particule, mais aussi le simple fait que la particule ait une position, dépendent de votre point de vue. Dans ce cas, supposer que les entités fondamentales soient des particules localisées est absurde.

Troisièmement, même si vous renoncez à localiser les particules et que vous vous contentez de les compter, vous serez confronté à des difficultés. Supposez que vous cherchiez à connaître le nombre de particules chez vous. Vous faites le tour de l'appartement et trouvez trois particules dans la salle à manger, cinq sous le lit, huit dans le buffet de la cuisine, et ainsi de suite. Maintenant, additionnez-les. Vous aurez la surprise de constater que la somme ne sera pas égale au nombre total de particules. Ce

nombre, en théorie quantique des champs, est une propriété de l'appartement dans son ensemble ; pour le déterminer, il vous faudrait faire l'impossible et mesurer tout l'appartement d'un seul coup, plutôt que pièce par pièce.

Un cas extrême illustrant à quel point les particules sont insaisissables est celui du vide, qui a des propriétés paradoxales en théorie quantique des champs. Vous pouvez avoir globalement un vide (par définition, c'est un état à zéro particule) tout en observant dans chaque région finie quelque chose de très différent du vide. En d'autres termes, votre appartement peut être complètement vide même si vous trouvez des particules dans tous les coins...

Le nombre de particules, fonction de l'observateur

Une autre propriété frappante du vide en théorie quantique des champs est ce qu'on nomme l'effet Unruh. Supposons qu'un astronaute se trouve dans un vaisseau immobile, dans ce qu'il pense être le vide. On montre par la théorie, et c'est l'effet Unruh, qu'un astronaute à bord d'un vaisseau accéléré par rapport au premier aura une perception très différente du même milieu : ses mesures lui indiqueront qu'il est immergé dans un bain thermique d'innombrables particules. Ce désaccord entre points de vue se produit également aux abords des trous noirs et conduit à des conclusions paradoxales sur le sort de la matière qui tombe sur de tels astres.

Si un vide plein de particules semble absurde, c'est parce que la notion classique de vide nous induit en erreur ; ce que la théorie décrit doit être autre chose. Si le nombre de particules dépend de l'observateur, alors il semble illogique de supposer que ces particules sont fondamentales. Nous pouvons accepter que de nombreuses propriétés dépendent de l'observateur, mais pas le nombre même de briques élémentaires.

Enfin, la théorie quantique montre que les particules peuvent perdre leur individualité. Dans le phénomène déconcertant de l'intrication quantique, plusieurs particules peuvent constituer un système plus gros et perdre les propriétés individuelles qui les distinguent les unes des autres. Les particules présumées peuvent alors partager des propriétés telles que l'éventail de positions dans lesquelles elles sont susceptibles de se trouver. Quand deux particules sont intriquées, l'observateur n'a pas le moyen de les distinguer : à ce stade, peut-on vraiment encore parler de deux objets ?

Un théoricien pourrait simplement décréter que nos soi-disant deux particules sont deux individualités distinctes. Pour les philosophes, ce diktat est de l'« eccéité primitive » (une individualité primitive, par essence). Par définition, cette eccéité est non observable. La plupart des physiciens et philosophes sont très sceptiques à l'égard de telles approches *ad hoc*. Il semble plutôt que l'on n'ait plus affaire à deux particules : le système intriqué se comporte comme un tout indivisible et la notion de partie, et à plus forte raison de particule, perd son sens.

Ces problèmes théoriques soulevés par les particules défient l'expérience. Qu'enregistrent donc les « détecteurs de particules » s'il ne s'agit pas de particules ? En fait, la détection d'une particule est toujours une inférence. Tout ce qu'un détecteur enregistre, c'est un grand nombre d'excitations isolées produites dans le matériau détecteur. Les ennuis surgissent quand nous relions les points correspondant à ces excitations et que nous inférons l'existence de particules ayant des trajectoires continues dans l'espace et le temps (dans certaines interprétations minoritaires de la physique quantique, on raisonne en termes de trajectoires bien définies, mais ces interprétations ont leurs propres difficultés ; je me cantonne ici à l'interprétation habituelle de la physique quantique).

Faisons donc le point. Nous nous représentons les particules comme de minuscules boules de billard, mais les entités que les physiciens d'aujourd'hui nomment « particules » ne leur ressemblent en rien. Selon la théorie quantique des champs, les objets ne peuvent être localisés dans aucune région finie de l'espace, si grande ou floue soit-elle. Qui plus est, le nombre de particules putatives dépend de l'état de mouvement de l'observateur. Tous ces résultats, pris collectivement, sonnent le glas de l'idée d'un monde composé de particules qui seraient des sortes de petites billes.

Sur la base de ces considérations et d'autres, force est de conclure que la « physique des particules » est une expression impropre : bien que les physiciens passent leur temps à parler de particules, ces objets n'existent pas. On pourrait parler de « particules quantiques », mais comment justifier l'utilisation du mot « particule » s'il ne recouvre presque plus rien de la notion

L'AUTEUR

Meinard KUHLMANN est professeur de philosophie à l'Université de Bielefeld en Allemagne. Il a une double formation, en physique et en philosophie.

Glossaire

Ontologie : Explication ou étude de l'être, de l'essence des choses.

Structure : Manière dont sont reliés entre eux des objets, concrets ou abstraits.

Réalisme : Conception selon laquelle il existe un monde indépendant de soi.

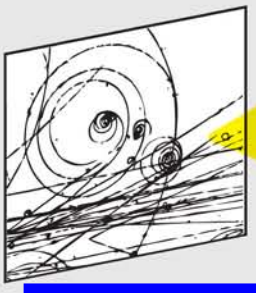
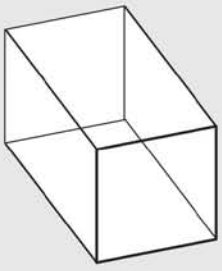
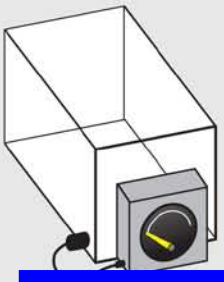
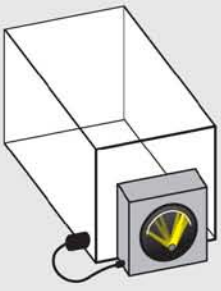
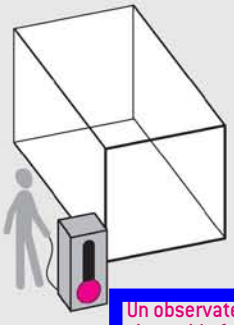
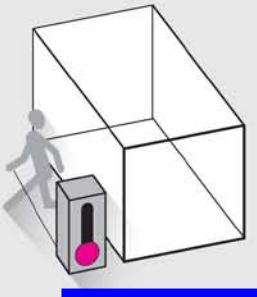
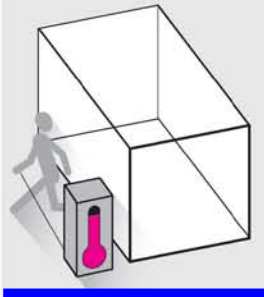
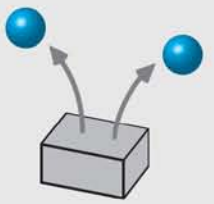
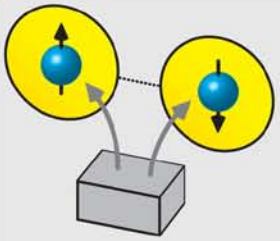
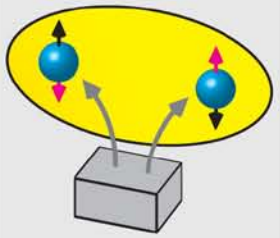
Réalisme structurel : Conception selon laquelle la réalité est caractérisée par des structures, où la nature des objets en relation importe peu.

Réalisme structurel épistémique : Version du réalisme structurel qui considère que la nature des objets en relation est inaccessible à la connaissance.

Réalisme structurel ontologique (ou ontique) : Version du réalisme structurel selon laquelle les structures ne sont définies que par des relations, les objets étant inexistants.

© Pour la Science - n° 432 - Octobre 2013

Il est tout naturel de penser que la physique des particules traite de particules. Cependant, il s'avère que les « particules » décrites par la théorie quantique ne correspondent pas au sens habituel du terme, qui désigne des constituants de matière individualisés et localisés. Il leur manque notamment les quatre attributs détaillés ci-dessous.

	Ce que l'on voit/calcule/fait	Ce que l'on infère	Pourquoi c'est faux
Les particules sont localisées Une particule occupe une position déterminée, qui varie continûment au cours du temps. Mais la théorie quantique, telle qu'on la comprend généralement, ne permet à aucun objet d'avoir une telle trajectoire.	 Des traces dans une chambre à bulles	Des particules traversent la chambre en laissant des traces	Tout ce que l'on voit est une succession de bulles ; les relier est une erreur
En l'absence de particules, rien ne peut se produire Si la matière est faite de particules, le vide, défini comme un état à zéro particule, ne devrait présenter aucune activité. Mais la théorie quantique prédit qu'un détecteur placé dans le vide enregistre quand même une activité.	 Un champ dans son état de vide	 Un appareil de mesure tel qu'un compteur Geiger ne détectera rien	 Un compteur Geiger grésillera
Soit une particule existe, soit elle n'existe pas Un objet est réel si tous les observateurs sont capables de s'accorder sur l'existence de cet objet. Les « particules » échouent à ce test : si un observateur voit un vide, un observateur accéléré par rapport à lui voit un gaz chaud de particules.	 Un observateur voit un vide froid	 Un autre observateur verra aussi un vide froid	 Un observateur accéléré voit un gaz chaud de particules
Les particules ont des propriétés déterminées Une particule a une énergie, une quantité de mouvement, etc. Mais chaque membre d'une paire de « particules » intriquées n'a plus de propriétés définies ; seul le système dans son ensemble en a.	 Production d'une paire de particules intriquées	 Chacune des particules a un spin bien défini	 Seul le système dans son ensemble a un spin bien défini

lassique de particule ? Il vaudrait mieux franchir le pas et abandonner complètement le concept.

Certains physiciens considèrent ces difficultés comme des preuves indirectes en faveur d'une interprétation de la théorie quantique des champs en termes de champs purs. Selon cette conception, les particules sont des ondulations d'un champ qui emplit l'espace comme un fluide invisible. Mais comme nous allons le voir, on ne peut pas non plus interpréter facilement en termes de champs la théorie quantique des champs.

L'expression « théorie quantique des champs » évoque naturellement une théorie qui traite de versions quantiques des champs classiques, tels le champ électrique et le champ magnétique. Mais qu'est-ce qu'une « version quantique » ? Le terme de « champ » évoque le champ magnétique qui aligne la limaille de fer autour d'un barreau aimanté et le champ électrique qui fait dresser les cheveux sur la tête, mais un champ quantique est tellement différent d'un champ classique que même les physiciens théoriciens avouent qu'ils ont du mal à se le représenter.

LE TABLEAU USUEL CONSTITUÉ des particules élémentaires et des champs de force médiateurs n'est pas une ontologie satisfaisante du monde physique.

Un champ classique fait correspondre à chaque point de l'espace et à chaque instant une quantité physique, par exemple la température, la pression ou l'intensité du champ électrique. Un champ quantique, quant à lui, fait correspondre à chaque point de l'espace-temps non pas une quantité physique, mais une entité mathématique abstraite, qui représente le type de mesure que l'on peut effectuer plutôt que le résultat qu'on obtiendrait.

Historiquement, les physiciens ont développé la théorie quantique des champs en « quantifiant » la théorie des champs classiques. Dans cette procédure, les théoriciens partent de l'équation classique à laquelle obéit le champ et remplacent ce dernier (représenté par une fonction de la position et du temps) par un « opérateur » dépendant de la position et du temps. Un opérateur est un objet mathématique représentant une opération telle que la différenciation ou l'extraction de la racine carrée (certains opérateurs peuvent correspondre à des processus physiques particuliers tels que l'émission et l'absorption de lumière).

Les opérateurs ajoutent une couche d'abstraction entre la théorie et la réalité. Un champ classique est analogue à une carte météorologique indiquant la température en tout lieu d'une région. Sa version quantique est analogue à une carte qui n'indiquerait pas « 40 °C » sur un lieu donné, mais, par exemple, « √ ». Pour obtenir la température, il faudrait passer par l'étape supplémentaire consistant à appliquer l'opérateur « √ » à une autre entité mathématique, nommée vecteur d'état et qui représente la configuration du système en question.

Pas d'image mentale pour le champ quantique

À certains égards, cette particularité des champs quantiques ne paraît pas surprenante. La physique quantique (la théorie générale sur laquelle est bâtie la théorie quantique des champs) ne gère pas non plus des valeurs bien déterminées, mais seulement des probabilités. Cependant, à y regarder de plus près, la situation est nettement plus bizarre avec un champ quantique. En effet, ce dernier ne spécifie même pas des probabilités ; il doit pour cela être combiné avec le vecteur d'état.

La nécessité d'appliquer le champ quantique, opérateur variant dans l'espace et le temps, au vecteur d'état, entité globale décrivant le système dans son ensemble et ne se référant à aucune position particulière, rend la théorie très difficile à interpréter, à traduire en quelque chose de physique que l'on peut imaginer et manipuler mentalement.

Un champ classique permet de visualiser des phénomènes tels que la lumière comme des ondes qui se propagent dans l'espace. Le champ quantique efface ce tableau et nous laisse bien en peine de dire comment fonctionne le monde.

Il est clair, dès lors, que le tableau usuel constitué des particules élémentaires et des champs de force médiateurs n'est pas une ontologie satisfaisante du monde physique : on ne sait même pas ce qu'est au juste une particule ou un champ. Une réponse courante consiste à dire qu'il faudrait envisager les particules et les champs comme des aspects complémentaires de la réalité. Mais cette caractérisation ne résout pas la difficulté : même dans les cas où nous sommes censés voir l'un seulement des deux aspects, aucune de ces notions ne fonctionne.

Heureusement, les notions de particule et de champ n'épuisent pas les ontologies possibles pour la théorie quantique des

© Pour la Science - n° 432 - Octobre 2013

champs. De l'avis d'un nombre croissant de personnes, ce qui compte vraiment, ce ne sont pas les objets, mais les relations qu'ils entretiennent. Cette vision rompt avec les conceptions atomistes et pointillistes du monde matériel encore plus radicalement que ne pourraient le faire les modifications les plus draconiennes des ontologies à particules et champs.

Initialement, cette position connue sous le nom de réalisme structurel a été introduite dans une version assez modérée, le « réalisme structurel épistémique ». Selon ce dernier, nous ne pourrons jamais connaître la véritable nature des choses, mais seulement leurs liens les unes avec les autres. Prenons l'exemple de la masse. Perçoit-on ou mesure-t-on la masse elle-même ? Non. On ne perçoit ou mesure que ce qu'elle signifie pour d'autres entités ou, concrètement, comment un corps massif est attiré par un autre corps massif par gravitation. La structure du monde, qui traduit comment les choses dépendent les unes des autres, est la composante la plus stable des théories physiques. De nouvelles théories pourraient bouleverser notre conception des briques élémentaires du monde, mais elles tendent à préserver les structures.

Le réalisme structurel à la rescousse ?

Et maintenant se pose la question suivante : pour quelle raison ne pouvons-nous connaître que les relations entre les choses et non les choses elles-mêmes ? La réponse la plus directe consiste à affirmer que les relations sont tout ce qui existe. Ce saut fait du réalisme structurel une proposition plus radicale, nommée réalisme structurel ontologique.

Les nombreuses symétries que l'on a découvertes en physique moderne étayent le réalisme structurel ontologique. En physique quantique comme dans la théorie de la gravitation d'Einstein (la théorie de la relativité générale), certains changements de configuration du monde, connus sous le nom de transformations de symétrie, n'ont pas de conséquences empiriques. Ces transformations échangent les éléments individuels dont le monde est constitué, mais laissent leurs relations inchangées. Par analogie, considérez un visage symétrique vu dans un miroir. Le miroir échange l'œil droit avec l'œil gauche, la narine droite avec la gauche, et ainsi de suite. Pourtant, toutes les positions relatives des traits du visage sont préservées. Ces relations sont ce qui définit véritablement un visage, alors que les qualificatifs « droite » et « gauche » dépendent de votre point de vue. Les objets que nous nommons particules et champs possèdent des symétries plus abstraites, mais l'idée est la même.

Selon le principe du rasoir d'Occam, les physiciens et les philosophes préfèrent les idées qui expliquent les phénomènes en utilisant le moins possible d'hypothèses. Dans le cas présent, on peut construire une théorie parfaitement valable en postulant l'existence de relations particulières sans avoir à supposer en plus des entités individuelles. Ainsi, les partisans du réalisme structurel ontologique affirment que nous ferions aussi bien de nous dispenser des objets et de supposer que le monde est constitué uniquement de structures, ou de réseaux de relations.

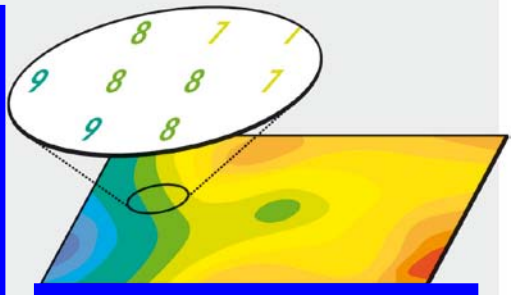
On rencontre dans la vie quotidienne de nombreuses situations où seules les relations comptent, et où décrire les objets en relation serait une complication inutile. Dans un réseau de métro, par exemple, il est crucial de savoir comment sont connectées les différentes stations. À Paris, la station Odéon est directement connectée à la station Mabillon, alors que depuis la station Saint-Germain-des-Prés vous devez changer de ligne au moins une fois, bien que Saint-Germain-des-Prés soit plus proche de Mabillon que Odéon. C'est la structure des connexions qui importe. Le fait que la station de métro Saint-Germain-des-Prés ait été ou non récemment rénovée est anecdotique pour celui qui doit emprunter le système.

DES CHAMPS SEMES D'EMBUCHES

Les physiciens nomment leur théorie de la matière « théorie quantique des champs ». Cela sonne comme une théorie des champs. Mais les champs supposément décrits par cette théorie ne sont pas ce que les physiciens entendent classiquement par le terme de « champ ».

Champ classique

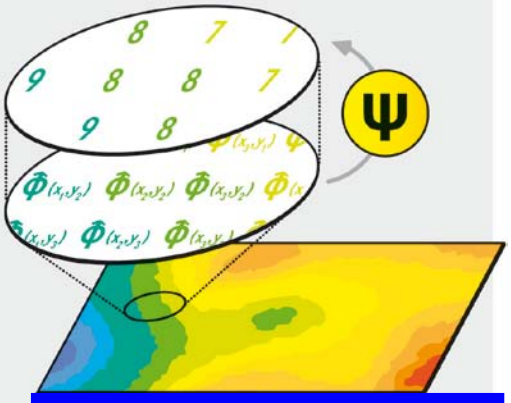
Par définition, un champ est analogue à un fluide qui emplit l'espace. En chaque point, sa valeur est mesurable. Un exemple est le champ électrique : l'amplitude du champ électrique au point où se trouve une particule chargée détermine l'intensité de la force électrique exercée sur cette particule.



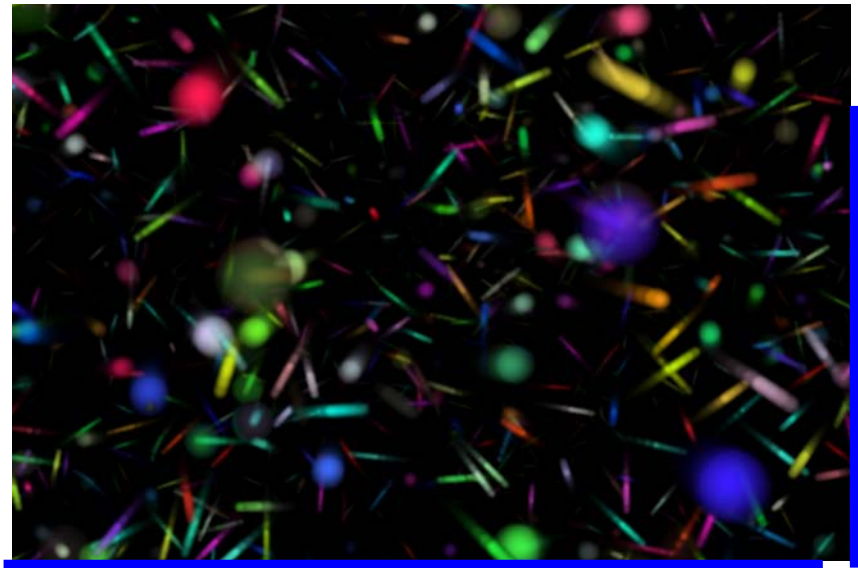
À chaque point est associée une valeur mesurable

Champ quantique

Les champs décrits par la théorie quantique ne correspondent pas à cette définition. À chaque point de l'espace n'est pas associée une quantité physique mesurable, mais un opérateur. Les probabilités de mesurer telle ou telle valeur d'une grandeur physique s'obtiennent en appliquant les opérateurs au « vecteur d'état » ψ, l'objet mathématique qui représente l'état du système entier.



À chaque point (x, y) est associé un opérateur Φ(x, y)



UNE REPRÉSENTATION IMAGÉE DES FLUCTUATIONS QUANTIQUES DU VIDE. Bien que le vide soit, en moyenne, dépourvu de particules, des paires particule-antiparticule de toutes sortes se créent spontanément et s'annihilent aussitôt.

D'autres exemples de structures qui prennent le dessus par rapport à leur réalisation matérielle sont le Web, les réseaux neuronaux du cerveau et le génome d'une espèce. Toutes ces structures continuent à fonctionner même quand des ordinateurs, des neurones ou des individus disparaissent. Ces exemples ne sont pas des analogies très strictes, mais, dans l'esprit, elles sont assez proches des arguments techniques qui s'appliquent à la théorie quantique des champs.

Un raisonnement assez voisin utilise l'intrication quantique pour appuyer l'idée que les structures sont au fondement de la réalité. L'intrication de deux particules est un effet holistique. Toutes les propriétés intrinsèques des deux particules, telle la charge électrique, ajoutées à toutes leurs propriétés extrinsèques, telle la position, ne suffisent pas à déterminer l'état du système de deux particules intriquées. Le tout est ici plus que la somme de ses parties. Le tableau atomiste du monde, dans lequel tout est déterminé par les propriétés de ses briques les plus élémentaires et la manière dont elles sont reliées dans l'espace-temps, se délite. Au lieu de considérer les particules comme primaires et l'intrication comme secondaire, peut-être devrions-nous envisager les choses dans l'autre sens.

Il paraît étrange qu'il puisse y avoir des relations sans *relata*, en d'autres termes sans objets soumis à ces relations. C'est un peu comme si l'on imaginait un mariage sans époux. De nombreux physiciens et philosophes trouvent eux aussi cela bizarre et pensent qu'il est impossible d'obtenir des objets tangibles simplement sur la base de relations.

Certains avocats du réalisme structurel ontologique essaient alors de proposer un compromis. Ils ne nient pas que les objets existent ; ils prétendent seulement que les relations, ou structures, priment sur le plan ontologique. Autrement dit, les objets n'ont pas de propriétés intrinsèques, seulement des propriétés dues à leurs relations avec d'autres objets. Mais cette position semble s'arrêter au milieu du gué. En effet, tout le monde est d'accord pour affirmer que les objets ont des relations ; la seule position nouvelle et intéressante serait que tout émerge purement sur la base des relations.

En fin de compte, le réalisme structurel est une idée qui a le mérite de bousculer nos *a priori*, mais qui a besoin d'être davantage développée avant que nous sachions si elle peut nous délivrer de nos problèmes d'interprétation.

Une autre alternative pour comprendre la théorie quantique des champs part d'une idée simple. Bien que les interprétations en termes de particules et en termes de champs soient d'habitude considérées comme radicalement différentes l'une de l'autre, elles ont quelque chose de crucial en commun. Toutes deux supposent que les unités fondamentales du monde matériel sont des entités individuelles persistantes auxquelles on peut attribuer des propriétés. Ces entités sont soit des particules, soit, dans le cas de la théorie des champs, des points de l'espace-temps. Beaucoup de philosophes, dont je fais partie, pensent que cette division en objets et en propriétés pourrait être la raison profonde pour laquelle l'approche des particules et celle des champs se heurtent toutes deux à des difficultés. Nous pensons qu'il vaudrait mieux envisager les propriétés comme étant la seule et unique catégorie fondamentale.

Généralement, les gens supposent que les propriétés sont des « universels », en d'autres termes qu'elles appartiennent à une catégorie générale abstraite. Elles sont toujours possédées par des objets particuliers ; elles ne peuvent pas exister indépendamment (en fait, Platon se les représentait comme existant indépendamment, mais seulement dans un monde supérieur, pas dans le monde qui existe dans l'espace et le temps). Par exemple, quand vous pensez au rouge, vous pensez généralement à des objets rouges particuliers, et non à une entité désincarnée nommée « rougeur ».

Mais on pourrait inverser cette façon de voir. On pourrait considérer les propriétés comme ayant une existence, indépendamment des objets qui les possèdent. Les propriétés pourraient être ce que les philosophes appellent des « particuliers » : des entités individuelles concrètes. Ce que nous appelons couramment un objet pourrait alors n'être en fait qu'un faisceau de propriétés : couleur, forme, consistance et ainsi de suite.

Un monde de propriétés et non d'objets

Parce que cette conception des propriétés comme des particuliers plutôt que comme des universels diffère de la vision habituelle, les philosophes ont introduit un nouveau terme pour les décrire : ce sont des « tropes ». Ce terme un peu bizarre véhicule malheureusement des connotations inappropriées, mais il est maintenant établi.

Interpréter les objets comme des faisceaux de propriétés n'est pas la manière habituelle de conceptualiser le monde, mais cela devient moins mystérieux si nous essayons de désapprendre notre représentation du monde et que nous nous replaçons dans les premières années de notre vie. Quand un enfant voit un ballon et en fait l'expérience pour la première fois, il ne perçoit pas à proprement parler un ballon. Ce qu'il perçoit est une forme ronde, d'une certaine teinte de rouge, avec une consistance un

© Pour la Science - n° 432 - Octobre 2013

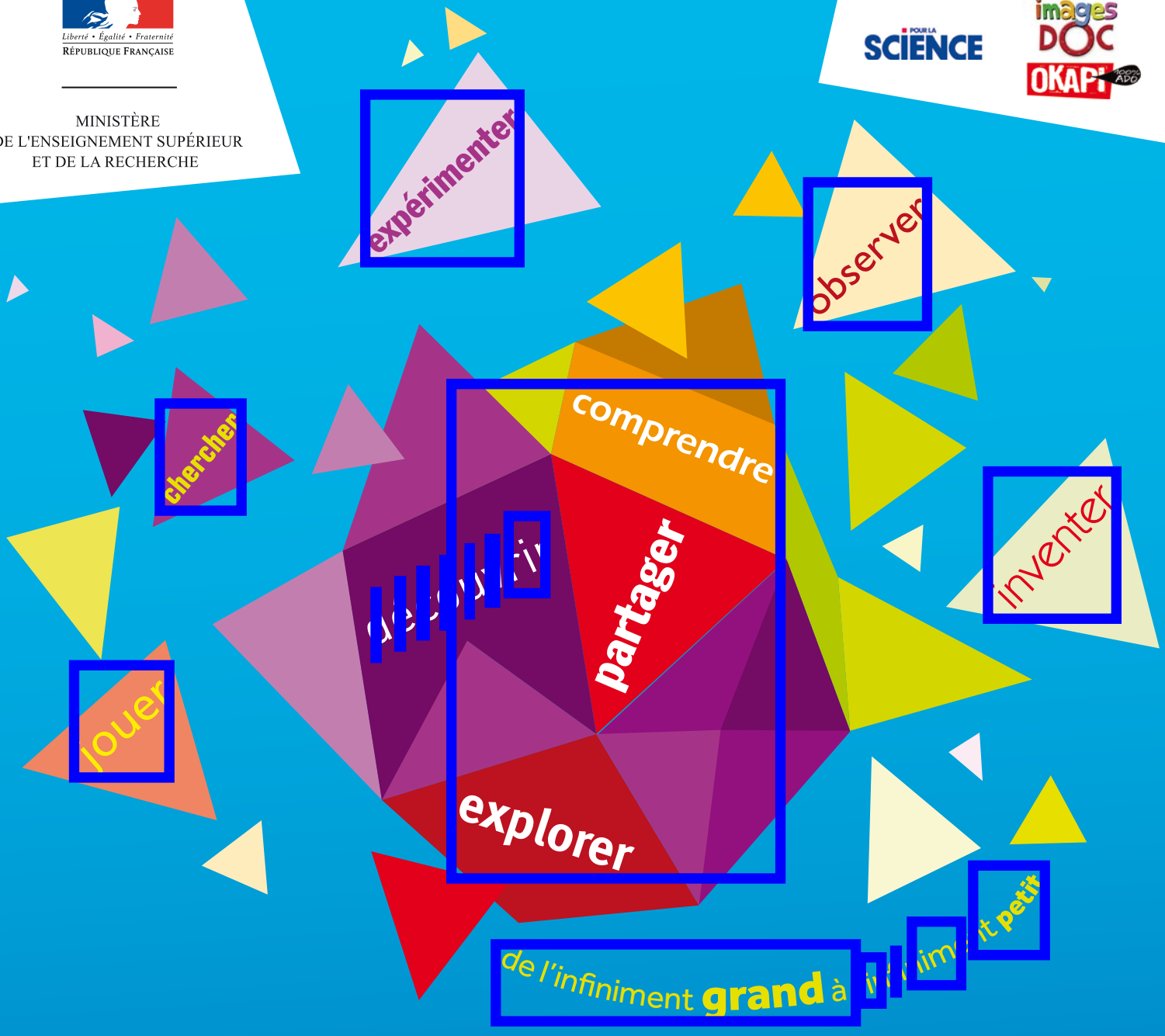
Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE
DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE

POUR LA SCIENCE

images DOC

OKAPI



FÊTE DE LA SCIENCE

9 - 13 octobre 2013

Retrouver toutes les animations dans votre région
www.fetedelascience.fr
www.facebook.com/fetedelascience
#FeteDeLaScience

peu élastique. Ce n'est que plus tard qu'il associe ce faisceau de perceptions à un objet cohérent d'un certain type, à savoir un ballon. La prochaine fois qu'il verra un ballon, il dira simplement « Tiens, un ballon ! », et il oubliera l'appareil conceptuel qui intervient dans cette perception qui n'est immédiate qu'en apparence.

Dans l'ontologie des tropes, nous revenons aux perceptions directes de l'enfance. Ici-bas dans le monde, les choses ne sont que des faisceaux de propriétés. Nous ne commençons pas par voir un ballon, auquel nous attachons ensuite des propriétés. Au contraire, nous avons un ensemble de propriétés et ensuite seulement nous nommons cela un ballon. Un ballon n'est rien de plus que ses propriétés.

De la métaphysique pour guider la physique

Appliquons cette idée à la théorie quantique des champs : ce que nous nommons un électron est en fait un faisceau de diverses propriétés ou tropes : trois propriétés essentielles fixes (masse, charge et spin), ainsi que de nombreuses propriétés non essentielles changeantes (position, vitesse). Cette conception en termes de tropes aide à comprendre la théorie quantique des champs. Par exemple, cette théorie prédit que les particules élémentaires peuvent apparaître subitement et disparaître tout aussi rapidement. Le comportement du vide en théorie quantique des champs est particulièrement déconcertant : la valeur moyenne du nombre de particules est zéro, et pourtant le vide fourmille d'activité. D'innombrables processus y ont lieu en permanence, impliquant la création suivie de l'annihilation de toutes sortes de particules.

Dans une ontologie à base de particules, cette activité est paradoxale. Si les particules sont fondamentales, comment alors peuvent-elles se matérialiser ? À partir de quoi se matérialisent-elles ? Dans l'ontologie des tropes, la situation est naturelle. Le vide, bien que vide de particules, contient des propriétés. Une particule est ce que l'on obtient quand ces propriétés se regroupent d'une certaine façon.

Comment peut-il y avoir autant de controverse fondamentale sur une théorie aussi fructueuse, empiriquement, que la théorie quantique des champs ? La réponse est simple. Bien que la théorie nous dise ce que nous pouvons mesurer, elle parle en énigmes dès lors qu'il est question de la nature des entités à l'origine de nos observations. La théorie rend compte de nos observations en termes de quarks, muons, photons et divers champs quantiques, mais elle ne nous dit pas ce qu'est véritablement un photon ou un champ quantique. Et elle n'a pas besoin de le faire, parce que les théories physiques peuvent être empiriquement valables en grande partie sans régler ces questions métaphysiques.

Pour de nombreux physiciens, c'est suffisant. Ils adoptent une attitude dite instrumentaliste : selon eux, les théories scientifiques ne représentent pas nécessairement la réalité du monde. Pour eux, les théories ne sont que des outils pour faire des prédictions expérimentales. Cependant, de nombreux physiciens ont le sentiment que leurs théories décrivent au moins certains aspects de la nature telle qu'elle est avant qu'une mesure ne soit effectuée. Après tout, que fait la science, sinon tenter de comprendre le monde ?

Pour brosser un tableau complet du monde physique, il est nécessaire de combiner la physique et la philosophie. Ces deux disciplines sont complémentaires. La métaphysique fournit divers cadres concurrents pour l'ontologie du monde matériel, même si, au-delà des questions de cohérence interne, elle n'est pas en mesure de trancher entre eux. Quant à la physique, il lui manque un exposé cohérent des questions fondamentales, telles que la définition de ses objets, le rôle de l'individualité, le statut des propriétés, la relation entre objets et propriétés, et la signification de l'espace et du temps.

La réunion des deux disciplines est particulièrement importante à certaines époques où les physiciens sont amenés à revisiter les fondements de leur domaine. La pensée métaphysique a guidé Isaac Newton et Albert Einstein, et elle influence beaucoup de ceux qui essaient d'unifier la théorie quantique des champs et la théorie de la gravitation d'Einstein. Les livres et articles écrits par des philosophes sur la physique quantique et la théorie de la gravitation remplissent des bibliothèques entières, alors que nous ne faisons que commencer à explorer la réalité sous-jacente à la théorie quantique des champs. Espérons que les alternatives aux visions classiques des particules et des champs que nous développons inspireront les physiciens dans leurs efforts pour réaliser enfin la grande unification. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Esfeld, **Ontic structural realism and the interpretation of quantum mechanics**, *European Journal for Philosophy of Science*, vol. 3(1), pp. 19-32, 2013.

M. Kuhlmann, **Quantum field theory**, *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, hiver 2012, http://plato.stanford.edu/archives/win2012/entries/quantum-field-theory.

M. Kuhlmann, **The Ultimate Constituents of the Material World : In Search of an Ontology for Fundamental Physics**, Ontos Verlag, 2010.

J. Bricmont et H. Zwirn (dir.), **Philosophie de la mécanique quantique**, Vuibert, 2009.

D. J. Baker, **Against field interpretations of quantum field theory**, *British Journal for the Philosophy of Science*, vol. 60(3), pp. 585-609, 2009, http://philsci-archive.pitt.edu/4132/1/AgainstFields.pdf.

M. Kuhlmann *et al.* (eds.), **Ontological Aspects of Quantum Field Theory**, World Scientific, 2002.

© Pour la Science - n° 432 - Octobre 2013

Vient de paraître

Les sens trompés

Des anomalies du cerveau aux comportements étranges

par Patrick Verstichel

Cet ouvrage est un recueil des articles que le neurologue Patrick Verstichel a publiés dans la rubrique « Le cas clinique » du magazine *Cerveau & Psycho*. En tant que médecin clinicien, il est confronté à des personnes qui présentent des symptômes inquiétants, surprenants, souvent inexpliqués. Après un examen clinique minutieux et les indispensables scanners IRM, il pose son diagnostic et propose une prise en charge adaptée.

Patrick Verstichel mène ses enquêtes médicales et scientifiques avec perspicacité. En nous présentant ces patients et leurs maladies sous forme de petites histoires, il nous fait comprendre comment fonctionne le cerveau, et pourquoi, parfois, il dysfonctionne. Un voyage étonnant au cœur du cerveau !

Éditions Belin/Pour la Science 2013
160 pages • 25 euros • ISBN 978-2-84245-111-(

BON DE COMMANDE

Cerveau & Psycho

découper ou à photocopier et à retourner accompagné de votre règlement à : Groupe Pour la Science • 628 av[illegible]ue du Grain d'Or • 41350 Vineuil • Tel. : 0 805 655 255 • e-mail : pourlasciencevpc@daudin.f

❑ Oui je commande l'ouvrage *Les sens trompés* de Patrick Verstichel.

..... exemplaires × 25 € (Réf. 075111) = ... €
Frais de port (4,90 € France – 12 € étranger) + ... €
TOTAL À REGLER = ... €

Je choisis mon mode de règlement
❑ par chèque à l'ordre de *Pour la Science*
❑ par carte bancaire
Numéro
Date d'expiration
Cryptogramme
Les 3 chiffres au dos de votre CB
Signature obligatoire

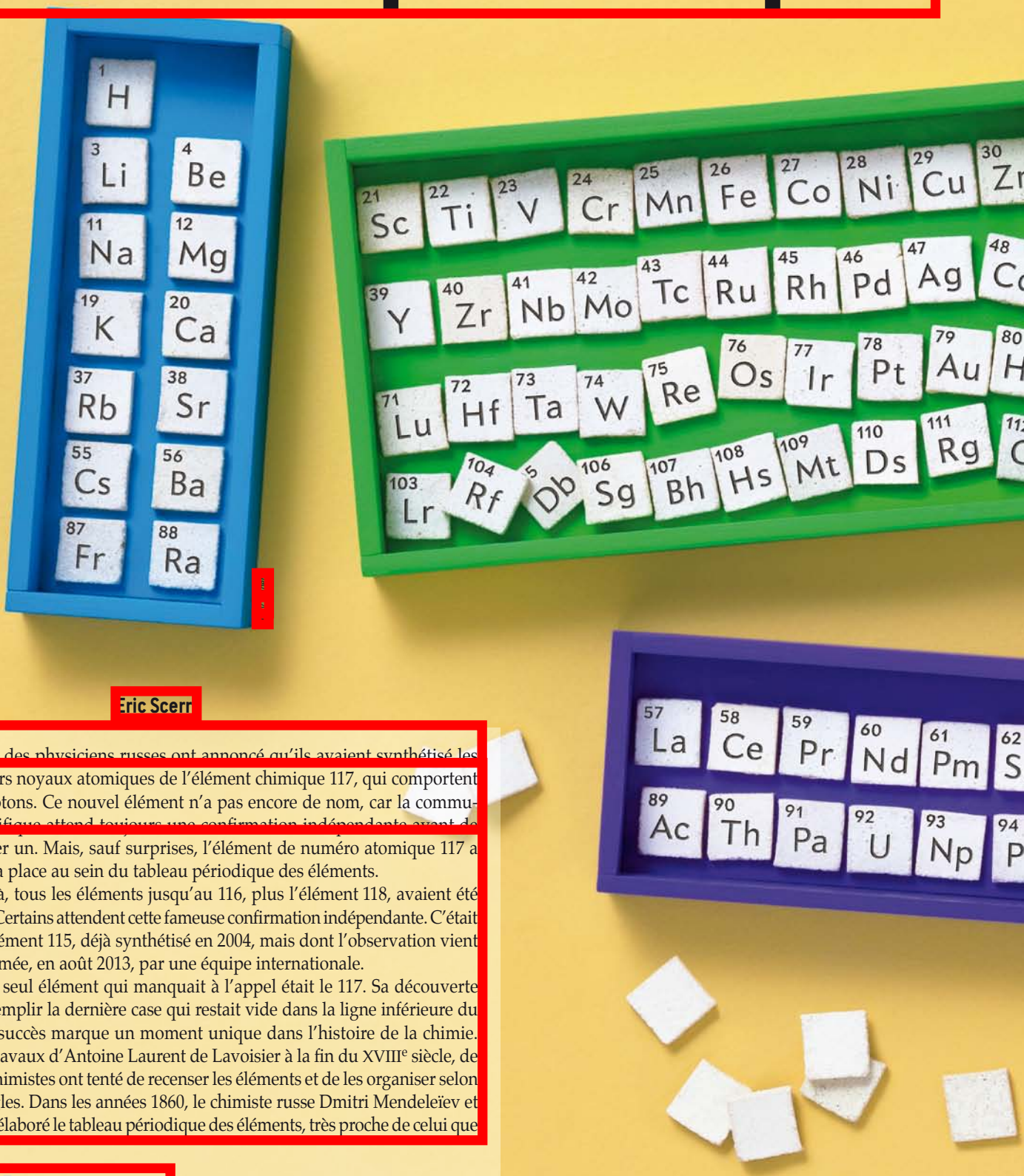
J'indique mes coordonnées
Nom :
Prénom :
Adresse :
C.P. : Ville
Pays : Tel.

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

E-mail pour recevoir la newsletter *Cerveau & Psycho* (à remplir en majuscules)

VERPLA31

Des failles dans le tableau périodique



Eric Scerri

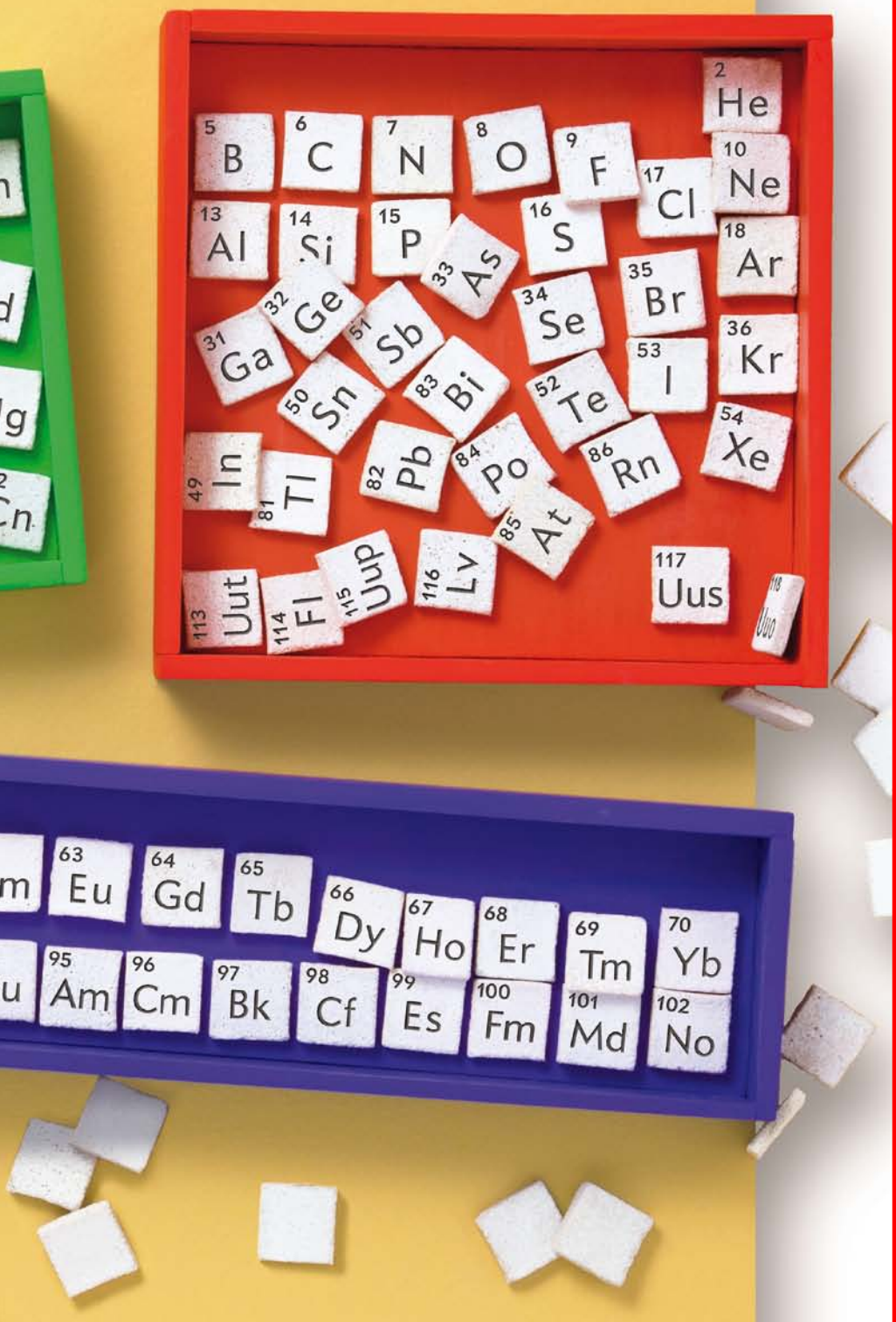
En 2010, des physiciens russes ont annoncé qu'ils avaient synthétisé les premiers noyaux atomiques de l'élément chimique 117, qui comportent 117 protons. Ce nouvel élément n'a pas encore de nom, car la communauté scientifique attend toujours une confirmation indépendante avant de lui en donner un. Mais, sauf surprises, l'élément de numéro atomique 117 a désormais sa place au sein du tableau périodique des éléments.

Jusque-là, tous les éléments jusqu'au 116, plus l'élément 118, avaient été découverts. Certains attendent cette fameuse confirmation indépendante. C'était le cas de l'élément 115, déjà synthétisé en 2004, mais dont l'observation vient d'être confirmée, en août 2013, par une équipe internationale.

Ainsi, le seul élément qui manquait à l'appel était le 117. Sa découverte permet de remplir la dernière case qui restait vide dans la ligne inférieure du tableau. Ce succès marque un moment unique dans l'histoire de la chimie. Depuis les travaux d'Antoine Laurent de Lavoisier à la fin du XVIII[e] siècle, de nombreux chimistes ont tenté de recenser les éléments et de les organiser selon certaines règles. Dans les années 1860, le chimiste russe Dmitri Mendeleïev et d'autres ont élaboré le tableau périodique des éléments, très proche de celui que

© Pour la Science - n° 432 - Octobre 2013

La découverte de l'élément 117 a permis de remplir le dernier trou dans le tableau de Mendeleïev tel que nous le connaissons. Mais ce tableau aux propriétés remarquables pourrait présenter des défauts.



l'on utilise aujourd'hui. Mendeleïev laissa plusieurs cases vides dans son tableau, et il fit le pari audacieux qu'un jour, de nouveaux éléments seraient découverts qui viendraient combler ces lacunes. Depuis, les prévisions du chimiste russe ont été confirmées.

Le tableau périodique a connu des aménagements, des ajouts, mais un principe essentiel a été préservé : sa structure repose sur des propriétés récurrentes parmi les éléments. En outre, le tableau a toujours eu des trous, mais avec l'élément 117, il est complet pour la première fois.

Le fantôme de Mendeleïev doit savourer son triomphe. Cependant, des chimistes et des physiciens nucléaires tentent de synthétiser des éléments de numéro atomique dépassant 118. Une telle découverte nécessiterait d'ajouter des lignes comportant de nouvelles cases vides.

Cette extension du tableau devrait continuer d'en suivre la logique de construction. Cependant, quelques anomalies plus fondamentales commencent à poindre. Le principe même des propriétés récurrentes ne semble plus infaillible. Quand Mendeleïev a conçu son tableau, il n'a pas seulement prévu l'existence d'éléments non encore observés ; de façon plus remarquable, il a deviné correctement leurs propriétés chimiques, en se fondant sur ces motifs récurrents.

En principe, deux éléments de la même colonne ont des propriétés similaires. Mais à mesure que le numéro atomique – le nombre de protons dans un noyau – augmentait, certains des éléments ajoutés ne se comportaient plus de la façon requise par le principe périodique. Les interactions chimiques de ces éléments, par exemple le type de liaisons qu'ils forment avec d'autres atomes, ne ressemblent pas à celles des autres éléments de la même colonne du tableau.

Pour quelle raison ? Autour des noyaux les plus lourds, certains des électrons sont en orbite à des vitesses représentant une fraction non négligeable de la vitesse de la lumière. Ils sont « relativistes », c'est-à-dire que les effets de la théorie de la relativité se font sentir. Le comportement de ces atomes diffère de celui attendu d'après leur position dans le tableau périodique. En outre, les

L'ESSENTIEL

- La découverte de l'élément 117 a permis de compléter le tableau périodique.
- Certains éléments lourds diffèrent par leur comportement chimique des éléments situés dans la même colonne, dérogeant aux principes d'organisation du tableau.
- Ces divergences seraient dues à des effets décrits par la théorie de la relativité restreinte et portant sur les électrons de l'atome.
- Les physiciens nucléaires étudient les propriétés des éléments les plus lourds du tableau pour comprendre ces effets.

LE TABLEAU PÉRIODIQUE COMPLET

semble marquer la réussite du projet de Mendeleïev et confirmer le principe de périodicité. Mais la théorie de la relativité restreinte vient noircir... le tableau.

calculs pour prévoir exactement les effets relativistes des électrons d'un atome sont complexes et l'étude de chaque élément requiert l'expérimentation. Ainsi, malgré le succès du tableau de Mendeleïev enfin rempli, sa puissance de prédiction semble avoir atteint une limite.

Il existe plus de 1 000 versions du tableau périodique avec des variantes dans l'arrangement des éléments, mais toutes partagent une caractéristique essentielle. Quand on dispose les éléments séquentiellement, dans l'ordre du numéro atomique, leurs propriétés chimiques tendent à se répéter de façon périodique. Par exemple, si nous partons du lithium et que nous avançons de huit cases, nous arrivons au sodium. Ces éléments ont de nombreuses caractéristiques communes. Tous deux sont des métaux assez mous pour être coupés avec un couteau, et tous deux réagissent vivement avec l'eau. Et si nous avançons encore de huit cases, nous atteignons le potassium, qui est aussi un métal mou et réagit avec l'eau.

Dans les tout premiers tableaux périodiques, incluant ceux conçus par Mendeleïev, la longueur de chaque période – et donc la longueur de chaque rangée (ou ligne) – était toujours de huit. Le tableau était agencé pour avoir, par exemple, le lithium, le sodium et le potassium dans la même colonne. Bientôt, cependant, on découvrit que les quatrième et cinquième périodes ne se répètent pas après huit éléments, mais après 18. En conséquence, les quatrième et cinquième rangées du tableau sont plus larges que les précédentes afin de recevoir le bloc supplémentaire d'éléments (les métaux de transition, qui se trouvent au milieu du tableau périodique dans la version usuelle). La sixième période se révéla être encore plus longue, contenant 32 éléments, en raison de l'inclusion d'une nouvelle série de 14 éléments. Ceux-ci forment avec le lutécium la famille des lanthanides (qui appartiennent aux terres rares).

À partir de 1937, les physiciens nucléaires ont commencé à synthétiser de nouveaux éléments, en commençant par le technétium. Celui-ci venait combler l'une des quatre lacunes du tableau périodique connu alors, qui allait de 1 (l'hydrogène) à 92 (l'uranium). Les trois autres pièces manquantes suivirent peu après ; deux d'entre elles ont été synthétisées (l'astate et le prométhium) et la troisième a été découverte dans la nature (le francium). Mais alors même que ces lacunes étaient comblées, de nouvelles découvertes ajoutaient des éléments au-delà de l'uranium, faisant de nouvelles cases vides dans le tableau périodique.

Le chimiste américain Glenn Seaborg remarqua que l'actinium, le thorium, le protactinium, l'uranium et les dix éléments suivants faisaient partie d'une nouvelle série, qui comportait 14 éléments. Avec le lawrencium, on les nomme les actinides.

Au cours de la première moitié du XX^{e} siècle, les physiciens et les chimistes ont compris que la périodicité des éléments trouve son origine dans la physique quantique et, en particulier, dans la physique des électrons en orbite autour du noyau. Ces orbites, ou « orbitales », ne ressemblent pas à celles des planètes, qui décrivent des ellipses autour du Soleil. Elles correspondent à des régions de l'espace autour du noyau où il est possible de localiser l'électron lors d'une mesure. Elles se présentent sous différentes formes et tailles *(voir l'encadré page ci-contre)*.

Les atomes de numéros atomiques élevés ont les mêmes types d'orbitales que ceux de numéros inférieurs, mais s'y ajoutent de nouveaux types d'orbitales. Les éléments de la première période ont uniquement une orbitale, de type noté *s*, qui peut être occupée par un ou deux électrons (un pour l'hydrogène, deux pour l'hélium). Pour les éléments des deuxième et troisième périodes s'ajoutent une autre orbitale de type *s* et trois orbitales d'une nouvelle sorte, notée *p*. Chacune de ces quatre orbitales peut être occupée par un ou deux électrons, pour un potentiel total de huit électrons – d'où la périodicité de huit dans les versions originales de la classification périodique. Les quatrième et cinquième périodes ont, en plus des types *s* et *p*, un troisième type d'orbitale, noté *d*, qui ajoute dix places supplémentaires pour les électrons et, par conséquent, étend les périodes à 18. Enfin, les deux derniers cycles ont des orbitales de types *s*, *p*, *d* et *f*, et ont une longueur de 32 éléments (18 + 14).

Quand Yuri Oganessian et ses collaborateurs à l'Institut unifié de physique nucléaire, à Doubna, près de Moscou, ont annoncé qu'ils avaient synthétisé « l'insaisissable » élément 117, tous les éléments de

© Pour la Science - n° 432 - Octobre 2013

UN CABINET DES CURIOSITÉS CHIMIQUES EN CONSTANTE EXPANSION

Le tableau périodique classe les éléments chimiques en fonction de leurs propriétés chimiques récurrentes. Celles-ci sont déterminées par les orbites des électrons d'un atome autour de son noyau, ou « orbitales » – en particulier par les orbitales les plus externes. En allant des numéros atomiques les plus bas aux plus élevés, la structure des orbitales externes change d'une façon périodique. Par exemple, les éléments 5 à 10 ont des orbitales externes de type *p*, tout comme les éléments 13 à 18. Tous ces éléments appartiennent au même « bloc *p* » *(en bleu)*.

Exemples de structures : Le lithium (Li) a deux orbitales *s* qui contiennent au total trois électrons (non représentés). Le bore (B) a deux orbitales *s* (quatre électrons) et une orbitale *p* avec un électron.

Un nouvel élément, un nouveau bloc

Cette version du tableau périodique est nommée le « tableau en escalier de Janet », d'après le Français Charles Janet (1849-1932), ingénieur, inventeur, chimiste, entomologiste, etc. ! Ce tableau conserve les colonnes du tableau classique et met en évidence la régularité des orbitales et leur remplissage. Les orbitales externes des éléments 119 et 120 seront de type *s*. L'élément 121 sera le premier à avoir des orbitales appartenant à une nouvelle famille, de type *g*.

Bloc *d* Bloc *f* Bloc *d* Bloc *p* Bloc *s*

Toutes les deux périodes, et donc toutes les deux rangées du tableau périodique, une nouvelle famille d'orbitales électroniques apparaît. Les formes des orbitales indiquent où l'électron a la probabilité la plus élevée de se trouver.

Orbitale *d* Orbitale *f* Orbitale *g* Orbitale *p* Orbitale *s*

La dernière ligne du tableau se trouvaient désormais en place. La relation entre la structure du tableau périodique et celle des atomes montre bien que ce tableau n'est pas simplement une affaire d'esthétique ou d'organisation de l'information sur le papier. L'élément 118, le dernier du tableau, a ainsi toutes ses orbitales *s*, *p*, *d* et *f* remplies par des électrons.

Si de nouveaux éléments sont synthétisés, il faudra ajouter une rangée de plus au tableau périodique. L'élément 119, probablement le suivant à apparaître sur la liste, devrait amorcer un nouveau cycle – avec à nouveau le type le plus simple d'orbitales, l'orbitale *s*. Les éléments 119 et 120 devraient occuper les deux premières cases de la huitième période. Mais avec l'élément 121, un bloc totalement nouveau serait nécessaire. Il mettrait en jeu des orbitales jamais rencontrées auparavant : les orbitales *g*. Ce nouveau type d'orbitales ajoute des possibilités pour les électrons et donc allonge la période, ce qui augmente le nombre de colonnes dans le tableau. Ce bloc d'éléments devrait porter à 50 le nombre de colonnes du tableau.

Mais avant de devoir ajouter une nouvelle période au tableau, les chimistes rencontrent un autre type de difficulté. Le tableau périodique complet – c'est-à-dire avec toutes ses rangées connues remplies – semble marquer la réussite du projet de Mendeleïev et confirmer le principe de périodicité. Mais la théorie de la relativité restreinte due à Albert Einstein vient noircir... le tableau.

Des électrons relativistes

La charge électrique du noyau atomique, due aux protons, augmente avec le numéro atomique. Plus cette charge est importante, plus les électrons des orbitales internes ont une vitesse élevée. Pour les noyaux lourds, la théorie de la relativité restreinte joue alors un

L'AUTEUR

Eric SCERRI est historien et philosophe de la chimie à l'Université de Californie à Los Angeles, aux États-Unis.

rôle notable. La taille des orbitales internes se réduit et leur stabilité augmente – l'énergie de ces orbitales diminue, ce qui a des répercussions sur les autres orbitales *s* et *p*. Ces dernières se rapprochent aussi du noyau, y compris les orbitales de « valence », les plus externes, qui régissent les propriétés chimiques de l'atome.

Tous ces phénomènes sont connus sous le nom d'effet relativiste direct, qui augmente en général avec la charge électrique du noyau. Certains effets concurrents compliquent la situation. Alors que l'effet relativiste direct stabilise certaines orbitales, un autre effet, l'effet relativiste indirect, déstabilise les orbitales *d* et *f*. Le phénomène est une sorte d'effet écran électrostatique dû aux électrons *s* et *p*. La charge électrique négative de ces électrons masque en partie la charge positive du noyau dont l'action s'exerce sur les lointains électrons *d* et *f*. Ces derniers sont alors moins liés au noyau, donc plus instables.

Certains effets relativistes à l'œuvre dans les éléments chimiques se manifestent dans la vie quotidienne. Par exemple, ils expliquent la couleur de l'or, qui se distingue des éléments incolores qui l'entourent dans le bloc d'orbitales *d* du tableau périodique – en particulier l'argent, qui se trouve juste au-dessus de l'or dans le tableau.

Quand un atome d'un métal du bloc *d* est frappé par un photon dont la longueur d'onde est adéquate, il subit une transition électronique. Un électron d'une orbitale *d* absorbe le photon et passe dans un état d'énergie plus élevé correspondant à une orbitale *s* supérieure. Dans le cas de l'argent, l'écart d'énergie entre les deux orbitales est assez grand, de sorte qu'il faut un photon de la région ultraviolette du spectre électromagnétique pour déclencher la transition. Des photons de lumière visible, dont l'énergie est inférieure, sont réfléchis ; c'est pourquoi ce matériau semble être un miroir.

Dans le cas de l'or, la contraction relativiste abaisse l'énergie des orbitales *s*, tout en augmentant l'énergie des orbitales *d*, réduisant ainsi l'écart entre ces deux niveaux. La transition requiert alors moins d'énergie – elle correspond à celle d'un photon de la partie bleue du spectre. Tandis que le bleu est absorbé, les photons des autres couleurs sont réfléchis – d'où la couleur jaune doré caractéristique de l'or.

Pekka Pyykkö, de l'Université d'Helsinki, et d'autres ont répertorié de nombreux comportements de l'or liés aux effets relativistes, en particulier des liaisons inattendues entre l'or et d'autres éléments. Les composés qui, selon eux, devaient résulter de telles interactions ont été découverts par la suite. Cette prouesse rappelle les exploits de Mendeleïev, qui avait prévu l'existence de nouveaux éléments. Parmi les prévisions couronnées de succès de P. Pyykkö figuraient des liaisons entre l'or et le xénon – « gaz rare » qui est extrêmement inerte – et des liaisons triples entre l'or et le carbone. Un autre succès était une molécule sphérique impliquant un atome de tungstène et 12 atomes d'or et ressemblant aux fullerènes de carbone, avec leur structure en ballon de football. Ce fullerène d'or se forme spontanément quand le tungstène et l'or sont vaporisés en présence d'hélium.

Les calculs de mécanique quantique relativiste se sont aussi révélés indispensables pour étudier comment des dépôts d'or peuvent agir comme catalyseurs, bien que l'or soit relativement inerte. Par exemple, cet élément peut décomposer des substances toxiques contenues dans les gaz d'échappement des automobiles.

Des surprises superlourdes

Même avec l'apparition d'effets relativistes, les éléments comme l'or s'écartent peu des caractéristiques attendues. La plupart des éléments dérogent peu au principe de périodicité et leurs propriétés s'accordent avec leur position dans le tableau périodique. Mais il y a eu des surprises. Certaines expériences sur la chimie des éléments les plus récemment découverts ont commencé à montrer qu'il pourrait bien y avoir de sérieuses failles dans le tableau périodique.

En utilisant des accélérateurs de particules pour faire entrer en collision des noyaux lourds, les physiciens nucléaires sont capables de produire des éléments « superlourds » – ceux qui se trouvent au-delà du numéro atomique 103. Les prédictions théoriques permettent de prévoir leurs nombres de protons et de neutrons. La découverte de noyaux magiques et d'« îlots » de stabilité (des groupes d'éléments stables dans le diagramme où les axes sont les nombres de protons et de neutrons) aide à préciser les modèles.

A cette époque, une collaboration franco-russe très active s'est orientée vers l'étude chimique des éléments superlourds et des actinides à partir de quelques atomes produits, en développant des méthodes de séparation et d'identification des produits de désintégration des éléments 104 à 109.

Les chercheurs français ont poursuivi les études des éléments superlourds avec les accélérateurs de Dubna en Russie et ceux du GANIL (Grand accélérateur national d'ions lourds), à Caen, pour comprendre leur structure, mettre en évidence des caractéristiques telles que leur durée de vie et explorer de nouvelles voies de synthèse… Mais le petit nombre d'atomes produits est un obstacle à leur étude.

À partir de 2015, le GANIL se dotera d'une nouvelle installation, SPIRAL 2. Les faisceaux de noyaux y auront une intensité au mieux 10 fois supérieure. Il sera possible de synthétiser et d'observer les éléments superlourds en grande quantité et avec un temps d'expérience réduit et raisonnable (d'une semaine à un mois). Une équipe internationale de physiciens nucléaires participe au développement technique des détecteurs, des cibles pour les faisceaux et d'un spectromètre qui permettra d'identifier les événements rares impliquant les éléments superlourds.

Les expériences apporteront des réponses plus précises sur la localisation du prochain îlot de stabilité et sur la structure des noyaux superlourds. La découverte récente de l'élément 117 par l'équipe de Y. Oganessian pourrait être confirmée par une expérience indépendante. Une façon de procéder passerait par la détection d'un isotope de l'élément 115 obtenu par la désintégration du 117.

Christelle Stodel
Chargée de recherche CNRS GANIL, Caen

SPIRAL 2, une usine à éléments superlourds

La recherche de noyaux dits superlourds est un important champ d'étude en physique nucléaire. En synthétisant ces nouveaux noyaux très exotiques, on espère notamment cerner la limite de la stabilité nucléaire et tester jusqu'où va la validité du principe de périodicité du tableau de Mendeleïev.

Depuis plusieurs décennies, les chercheurs français ont contribué à cette recherche des éléments superlourds par différents biais. En 1970, à Orsay, avec le premier accélérateur complexe d'ions lourds, ALICE, une équipe a recherché l'élément 126 qui correspondait au noyau « magique » succédant à l'isotope 208 du plomb (82 protons et 126 neutrons). Les noyaux magiques sont particulièrement stables. Les mo

© Pour la Science - n° 432 - Octobre 2013

mières expériences des années 1990 sur le utherfordium (104) et le dubnium (105) uggéraient déjà que ces éléments n'avaient as les propriétés attendues d'après leur osition dans le tableau périodique. Ken Czerwinski et ses collègues, à l'Université de Californie à Berkeley, ont découvert que, n solution, le rutherfordium réagissait de açon similaire au plutonium, qui est très loigné dans le tableau périodique. De même, le dubnium présentait des signes de comportement comparable à celui du rotactinium, élément à nouveau assez loigné dans le tableau périodique. En 'absence d'effets relativistes, ces deux léments auraient dû se comporter comme eux qui se trouvent directement au-dessus d'eux, à savoir le hafnium et le tantale. Ces mesures difficiles restent à confirmer.

Dans les travaux plus récents, les hercheurs ont synthétisé de nouveaux léments superlourds, mais seulement n nombre limité (la découverte de l'élément 117 repose ainsi sur l'observation de ix atomes seulement). De plus, les éléments superlourds sont très instables ; ils e désintègrent en éléments plus légers en ne fraction de seconde. Les scientifiques ont réduits à observer les débris de cette décomposition nucléaire, qui fournit des nformations sur la physique et la chimie des noyaux éphémères. Ainsi, étudier les propriétés chimiques grâce à la chimie « par voie humide » classique – mettre la substance dans un flacon et observer comment elle réagit avec d'autres composés himiques – est impossible. Et pourtant es scientifiques ont trouvé des techniques ngénieuses pour étudier la chimie de ces léments, atome par atome.

Comme le mercure ou comme le radon ?

Les expériences chimiques effectuées sur les deux éléments suivants, le seaborgium (106) et le bohrium (107), ont été décevantes comparées à celles menées sur les éléments 104 et 105. En effet, le seaborgium et le bohrium semblent réagir comme l'anticipent les règles de Mendeleïev, qui ignorent les effets relativistes. Le principe périodique semblait reprendre les commandes !

Dans le cas de l'élément 112, les himistes et les physiciens ont voulu savoir si cet élément se comporte plutôt comme le mercure, qui se trouve juste au-dessus de ui dans le tableau périodique, ou comme e radon, un gaz rare, ainsi que le prévoient ertains calculs relativistes. Dans quelques xpériences, des chercheurs ont synthétisé des atomes de l'élément 112, accompagnés d'isotopes lourds du mercure et du adon. Ces derniers existent à l'état naturel, mais les physiciens utilisent des éléments de synthèse, car ils peuvent les produire dans des conditions identiques à celles qui donnent naissance à l'élément 112.

Les expérimentateurs ont alors déposé es atomes sur une surface maintenue à très asse température et recouverte en partie d'or et en partie de glace. Si l'élément 112 se comporte vraiment comme un métal, il se liera à l'or. S'il est davantage comparable au radon, il aura tendance à se déposer sur a glace. À ce jour, plusieurs laboratoires ont obtenu des résultats différents, et la situation est encore loin d'être clarifiée.

Les effets relativistes sur l'élément 114 ont aussi été étudiés. Les premiers résultats, rapportés par Robert Eichler et son équipe à l'Institut Paul Scherrer, en Suisse, ont surpris les scientifiques, tant ils vont à l'encontre de la théorie.

La poursuite des recherches sur la himie des éléments superlourds devrait clarifier les divergences entre résultats expérimentaux et calculs théoriques. Simultanément, de nouveaux éléments seront ajoutés au tableau périodique. Une question plus générale est alors de savoir si ce tableau aura une fin. Le consensus général est que lorsque le nombre de protons devient trop grand, les noyaux ne se forment plus, même pendant un instant. Mais les opinions diffèrent sur le numéro atomique maximal. Selon certains calculs qui considèrent le noyau comme ponctuel, la limite se trouverait à l'élément 137. D'autres, qui ont pris en compte le volume du noyau, estiment que l'élément final sera le numéro atomique 172 ou 173.

On ignore encore si le principe de la périodicité du tableau s'applique aux éléments superlourds. Si les écarts dans les propriétés des atomes deviennent importants et systématiques, le tableau perdra son pouvoir prédictif. Mais cela ne retirera en rien son utilité pour de nombreux éléments. En général, le chimiste n'est pas confronté aux éléments les plus lourds – et instables – du tableau. Ainsi, 150 ans après sa conception, malgré les corrections dues aux effets relativistes, le tableau périodique de Mendeleïev est loin d'être obsolète et rend toujours de nombreux services. ■

À la recherche de l'élément 119

Des éléments plus lourds que le 118 existent probablement. Leur découverte obligera à étendre le tableau périodique. Yuri Oganessian *(ci-dessus)*, qui a dirigé l'équipe ayant créé l'élément 117, est maintenant prêt à tenter la synthèse du prochain élément, le 119. Celui-ci sera dans la colonne des alcalins, comme le lithium, le sodium, le potassium et le francium. Mais les effets relativistes pourraient lui donner des propriétés différentes.

BIBLIOGRAPHIE

E. Scerri, **A Very Short Introduction to the Periodic Table**, Oxford University Press, 2011.

P. Pyykkö, **A suggested periodic table up to Z ≤ 172, based on Dirac-Fock calculations on atoms and ions**, *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 13, pp. 161-168, 2011.

E. Scerri, **Le tableau périodique des éléments, d'hier à demain**, *Pour la Science* n° 369, pp. 22-27, juillet 2008.

E. Scerri, **The Periodic Table, its Story and its Significance**, Oxford University Press, 2007.

HISTOIRE DES SCIENCES

Innovations et secrets, les « plis cachetés » de l'Académie des sciences

Depuis 1735, il est possible de déposer à l'Académie française des sciences une réflexion scientifique ou une invention sous la forme d'un pli cacheté. Qui sont les auteurs de ces plis ?

Edgardo D. CAROSELLA et Pierre BUSER

Au XVIIIe siècle, en France, fut créée à l'Académie royale des sciences une procédure grâce à laquelle toute personne pouvait déposer, auprès de son secrétaire perpétuel, des réflexions dans un domaine précis de la science, un point de vue, un message ou une invention qui lui auraient paru dignes d'être conservés. Le pli (jadis nommé pacquet, puis paquet) était cacheté, signé par son auteur, et son dépôt était en général accepté. L'auteur pouvait ensuite le retirer ou, au contraire, lui-même ou ses ayants droit avaient la possibilité d'en demander ultérieurement l'ouverture.

Depuis le dépôt du premier pli, en 1735, beaucoup sont restés clos et se sont de la sorte accumulés. C'est pourquoi une Commission fut créée en 1976, sous l'impulsion du secrétaire perpétuel Paul Germain. Sa mission était de procéder à l'ouverture des plis 100 années après le dépôt, à moins que les légataires ayants droit l'aient exigée plus tôt ou que le déposant lui-même, toujours vivant, l'ait demandée.

Jusqu'ici, la Commission s'est toujours pliée à ces diverses règles en essayant (car telle est sa tâche essentielle) de décider, lors de ses réunions (en principe bisannuelles), de l'intérêt d'un pli qui vient d'être ouvert et de désigner d'éventuels rapporteurs qui évalueront sa valeur scientifique. Le cas échéant, elle préconise son insertion, avec commentaires, dans une des publications de l'Académie.

Si cette procédure fut jadis créée, c'est parce que l'Académie royale des sciences avait alors parmi ses attributions premières « l'examen des machines ». Cette mission qui avait été confiée afin que soit déterminé l'intérêt économique des inventions, de façon à les protéger des contrefaçons ou de procédés concurrents. Entre 1666 et 1735, l'Académie a ainsi accordé son agrément à 377 machines, conférant à leurs auteurs un privilège exclusif d'exploiter cette découverte. Et, de fait, le premier pli ouvert le 27 octobre 1976 débute ainsi : « Comme j'appréhende que l'ouvrier qui travaille mes machines ne divulgue mon dessein… »

Mais bientôt s'est imposée une importante restriction à propos des droits que confèrent les plis cachetés. Dès 1844, une loi a spécifié que « l'antériorité ne résulte pas d'un mémoire déposé sous pli cacheté à une société savante et ouvert postérieurement à la demande du brevet », ce qui, bien sûr, incluait ceux qui avaient été déposés à l'Académie. Dès lors a disparu toute stratégie commerciale qui aurait pu tenter certains déposants, les règles en vigueur à l'Académie stipulant que le dépôt d'un pli ne peut en aucun cas constituer une prise de date équivalant à celle d'un brevet. En somme, si un flou a existé à cet égard dans les temps anciens, certains dépôts de plis pouvant être mis au compte d'un tel intérêt, toute tentative d'utiliser les plis cachetés comme dépôt de brevet est ensuite devenue exclue et inopérante.

Quelles motivations animent les déposants ? Que cache ce besoin de mettre au secret ses propres pensées et hypothèses ? C'est ce que nous avons essayé de découvrir en nous livrant à une sorte d'enquête socioculturelle et psychologique sur les plis cachetés et le contexte de leur dépôt. Certes, dans nombre de cas, il reste difficile de déterminer le pourquoi d'un dépôt, que le déposant soit déjà connu ou qu'il ne le soit pas encore, ou encore qu'il soit destiné à rester inconnu. On ne peut toutefois éviter certaines inférences, dont voici quelques exemples.

Plus de 16 000 plis entre 1735 et 1983

Tout d'abord, quelques chiffres. Entre 1735 et 1983, plus de 16 000 plis cachetés ont été déposés, soit environ 6 par an de 1730 à 1830, et 95 par an de 1830 à 1983. Parmi les auteurs de quelque 7 000 plis déposés pendant la période 1760-1960, on dénombre environ 800 membres de l'Académie, 1 500 ingénieurs, 1 400 médecins, 1 360 professeurs et chercheurs, 400 officiers, 280 artisans, etc.

Le nombre de plis fluctue selon les années. Cette variation reflète certes les événements historiques ou politiques de la vie française, mais aussi, nous le verrons, des événements scientifiques ou techniques généralement extérieurs à l'Académie. Ainsi a-t-on noté une affluence de plis au cours de la Première Guerre mondiale, autour de 1917.

de médecins ou d'officiers intéressés par les divers aspects de la défense nationale. En revanche, pendant la Seconde Guerre mondiale, l'Académie, en semi-léthargie, n'a eu à accepter que peu de plis.

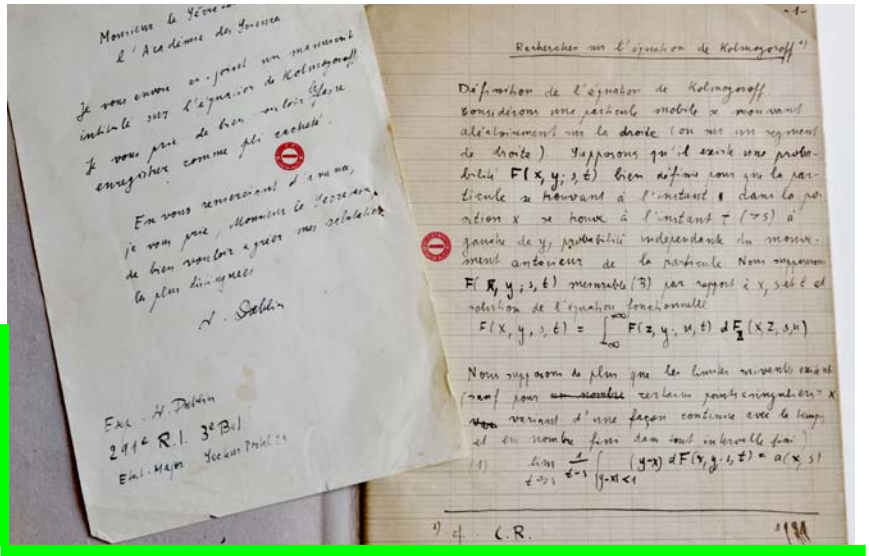
De 1983 à 1991, le nombre de plis déposés a été en moyenne de 74 par an. Depuis, l'Académie reçoit chaque année 48 plis en moyenne. La plupart de leurs auteurs ne signalent aucune appartenance à une université ou à un laboratoire de recherche.

De tous ces plis, seule une faible fraction a été ouverte ou retirée à la demande du déposant, comme si ces documents n'avaient d'intérêt que dans le cas où une réclamation de priorité se serait présentée avant leur publication. Telle est peut-être la raison pour laquelle des documents d'auteurs prestigieux sont parvenus jusqu'à nous, leur ouverture n'ayant pas été demandée, car aucun inventeur en quête de priorité ne s'était déclaré. C'est le cas des plis du chimiste Antoine Laurent de Lavoisier, du physico-chimiste Louis Pasteur, du médecin et physiologiste Claude Bernard, du physicien Henri Becquerel, de l'inventeur Charles Cros, du médecin et physiologiste Étienne-Jules Marey, du mathématicien Henri Poincaré, de l'inventeur Nicéphore Niepce et de bien d'autres.

Querelles bernoulliennes

Parmi ces plis d'auteurs passés à la postérité, quelques-uns retiennent particulièrement l'intérêt. D'abord, deux documents anciens, qui vont déjà bien au-delà de la préoccupation première de l'Académie pour les machines et qui marquent ce que sera la suite, c'est-à-dire un intérêt pour la science spéculative. Ces deux plis concernent les frères Jakob (ou Jacques) et Johann (ou Jean) Bernoulli, tous deux mathématiciens, le premier à Bâle, en Suisse, et le second à Groningue, aux Pays-Bas. On lit ainsi dans les *Registres des Procès-Verbaux des séances de l'Académie royale des sciences* que « M. le Marquis de l'Hospital a ouvert le 13 avril 1697 le

1. QUELQUES-UNS DES NOMBREUX PLIS cachetés reçus par l'Académie des sciences. Plus de 18 000 plis ont été déposés entre les années 1735 et 2012.



2. TRAGIQUE HISTOIRE que celle du pli du mathématicien Wolfgang Doeblin, d'origine allemande, mais mobilisé dans l'armée française et combattant au front en 1940. Sur de modestes cahiers, il se livre à un travail élaboré sur la résolution de l'équation de Kolmogoroff, qui régit la probabilité des positions d'une particule soumise à un processus de diffusion. Le jeune homme met son travail à l'abri sous forme d'un pli cacheté en février 1940, mais meurt quelques mois plus tard. Le pli n'a été ouvert et analysé qu'en 2000, avec l'autorisation de son frère ayant droit. Doeblin a alors été reconnu comme précurseur et a reçu de ses pairs une consécration méritée.

pacquet qu'il avait mis cacheté entre les mains du secrétaire le 16e de mars et a lu la solution qu'il avait trouvée du problème de Mr (Jean) Bernoulli, *de linea celerrimi descensus* ».

Dans la lignée des défis mathématiques que se lançaient les savants au XVIe siècle, Jean Bernoulli avait invité en 1696 les mathématiciens à résoudre le problème suivant, aujourd'hui connu sous le nom du défi de la brachistochrone : deux points A et B étant donnés dans un plan vertical, quel est le chemin le plus rapide pour un mobile qui descendrait de A vers B sous la seule action de la pesanteur ? Le 1er février 1701, Jean Bernoulli envoyait à son tour un pacquet cacheté contenant des solutions au problème dit des isopérimètres « afin qu'il soit gardé et ne soit ouvert que quand les solutions des mêmes problèmes de M. Bernoulli de Basle son frère auraient paru ».

Ici, les motivations paraissent claires – rivalités et souci d'antériorité –, car les chroniques de l'époque rapportent à l'envi

L'affaire des rayons N

L'affaire des rayons N entre dans le cadre de ce que le prix Nobel de chimie Irving Langmuir appela la science pathologique, où les phénomènes étudiés sont à la limite de la perception et ne peuvent être mesurés – avec une étonnante précision – que par leurs découvreurs ou des opérateurs spécialement entraînés.

Le 23 mars 1903, René Blondlot, professeur de physique à la Faculté des sciences de Nancy et correspondant de l'Académie des sciences depuis 1894, déposa une note aux *Comptes Rendus*, intitulée *Sur une nouvelle espèce de lumière*. Les radiations, nommées rayons N en l'honneur de la ville de Nancy, présentaient des propriétés inconcevables, et toutes les substances les émettaient, à l'exception du bois vert et de certains métaux traités. En 1903, Blondlot prétendit avoir produit des rayons N à l'aide d'un fil chauffé à l'intérieur d'un tube de fer. Les rayons étaient détectés par un écran de sulfure de calcium qui brillait légèrement dans l'obscurité lorsque les rayons étaient réfractés par un prisme d'aluminium. Le chercheur affirmait qu'un flux étroit de rayons se réfractait par le prisme et produisait un spectre. Les rayons étaient censés être invisibles, sauf lorsqu'ils frappaient l'écran.

Sceptique, car des laboratoires anglais et allemands n'avaient pu les reproduire, la revue *Nature* demanda au physicien américain Robert Wood, de l'Université Johns Hopkins, d'enquêter sur la découverte de Blondlot. Wood soupçonnait l'erreur scientifique. Afin d'en faire la démonstration, il retira, à l'insu de Blondlot et de son assistant, le prisme du détecteur de rayons N. En principe, sans cette pièce, l'appareil devenait inopérant. Pourtant, l'assistant de Blondlot, qui mena l'expérience devant Wood, aperçut les rayons. Wood tenta alors de remettre le prisme à sa place, mais l'assistant surprit son geste et crut qu'il essayait de retirer la pièce. À l'essai suivant, l'assistant jura qu'il ne voyait pas les rayons, alors que le prisme était à nouveau en place.

Paru en septembre 1904 dans *Nature*, le récit de Wood mit fin à l'engouement pour les rayons N. Sans mettre en cause la bonne foi et l'honnêteté de Blondlot, on le reconnut victime d'un phénomène d'autosuggestion qui entraîna plusieurs autres chercheurs, connus ou non.

En trois ans, plus de 300 articles furent publiés sur le même sujet. Et sur les 14 notes présentées par Blondlot aux *Comptes Rendus* en 1903 et 1904, 4 ont été précédées par le dépôt d'un pli cacheté, de titre très voisin, quelques semaines ou mois auparavant. Il n'a pas été le seul à en déposer tout au long de cette période. Même début 1905, l'Académie reçut encore des plis relatifs aux rayons N. Malgré la faiblesse des arguments en faveur de ces rayons – d'infimes variations subjectives de la luminosité sur un écran –, nombre de savants distingués ont passé du temps à mon- er des expériences élaborées destinées à étudier leurs propriétés.

Cet engouement s'explique par l'énorme intérêt que suscitaient à l'époque, chez les physiciens et les physiologistes, les nouveaux rayonnements découverts au tournant du siècle. En 1895, le physicien allemand William Röntgen avait découvert les rayons X et, en 1903, Henri Becquerel et Pierre et Marie Curie avaient reçu le prix Nobel de physique pour leurs travaux sur la radioactivité de l'uranium et du polonium. On conçoit que certains chercheurs se soient précipités pour étudier les rayons N et publier en toute hâte. Dans ce contexte, le dépôt de plis cachetés assurait les découvreurs potentiels que leur priorité ne pourrait être contestée. Mais ni Blondlot ni aucun de ses confrères n'ont demandé l'ouverture des plis déposés. Les rayons N étant tombés dans l'oubli en moins de deux ans, personne n'avait contesté la priorité de leurs « découvertes »…

© Pour la Science - n° 432 - Octobre 2013

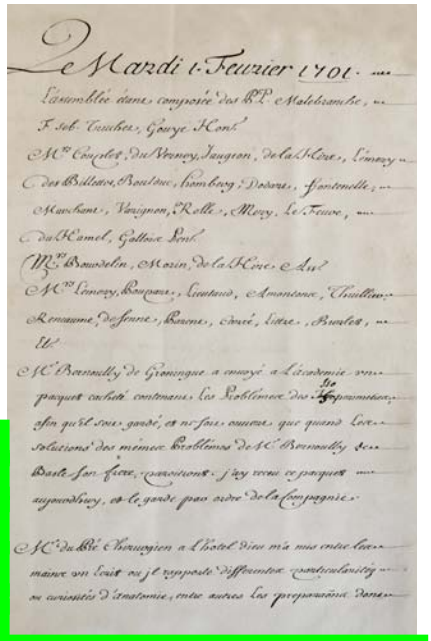
es relations difficiles entre les deux frères Bernoulli. Jean aurait lancé le problème de a brachistochrone, dont il connaissait une solution, pour défier son frère. Celui-ci, dont la solution se révéla lourde et laborieuse, rétorqua en lançant le problème des isopérimètres – que Jean ne sut résoudre correctement. Une controverse s'en est suivie, impliquant l'Académie royale des sciences par le biais du pli cacheté. Quant au marquis de l'Hospital, il a sans doute voulu prendre date…

Un curieux pli de Pasteur

La motivation de Louis Pasteur, lors du dépôt de son dernier pli, est bien plus complexe. Pasteur avait déjà déposé trois plis (un en 1848, deux en 1850), sans en solliciter l'ouverture, sans doute parce qu'il n'avait eu aucun problème d'antériorité sur leur contenu. Ils furent ouverts en 1963 ; l'un portait sur les tartrates, les deux autres sur le pouvoir rotatoire de certaines substances.

Bien plus tard, le 26 juillet 1869, devenu membre de l'Académie des sciences, Pasteur déposa un dernier pli qu'il ne fit jamais ouvrir. L'ouverture eut lieu en février 1988. Motif du pli : une maladie du ver à soie, dite pébrine, alors très dévastatrice, en particulier pour les éleveurs du Gard. Pasteur avait été sollicité par des autorités politiques locales pour tenter d'y remédier ; il travailla sur cette maladie à partir de 1865, sans y avoir été préparé. Or une équipe autrichienne avait progressé sur ce problème et avait publié un document le 15 juillet 1869, dont Pasteur prit connaissance le 20 juillet. Après la lecture de ce document, il rédigea un pli à la hâte et, six jours plus tard, le déposa « pour écarter tout débat de priorité », réfutant point par point, microphotographies à l'appui, les conclusions des Autrichiens.

On peut s'interroger sur la raison de ce dépôt effectué à propos d'un sujet qu'il connaissait mal. La parution d'un ouvrage l'année suivante rendit inutile l'ouverture du pli, puisqu'il reprenait les mêmes conclusions et qu'aucune polémique de priorité avec les Autrichiens ne s'en était suivie. En fait, Pasteur semble avoir répondu à des attentes politiques dans une région durement touchée. Il n'avait pas l'antériorité, mais il souhaita sans



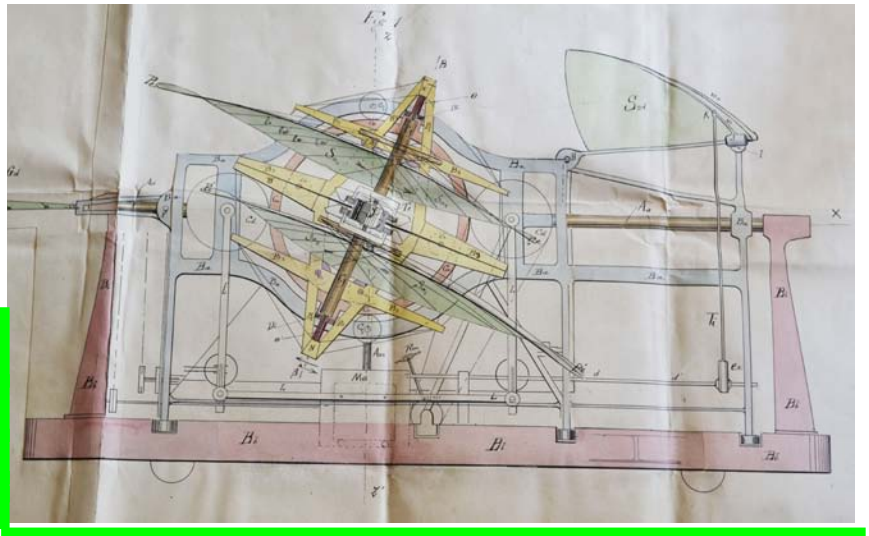
Le Mardi 1. Fevrier 1701. …
L'assemblée étant composée des RR. P. Malebranche, …
F. Sol. Cuthes, Gouye, Mont.
Mrs Cassini, Du Verney, Jaugeon, de la Hire, Lemery …
des Billettes, Boulduc, Lamberg, Dodart, Fontenelle, …
Marchant, Varignon, Rolle, Mery, Le Fevre, …
du Hamel, Gallois Sont.
Mrs Bourdelin, Morin, de la Hire, et Auz.
Mrs Lemery, Poupart, Lieutaud, Amontons, Chevalier …
Remond, de Jussieu, Barons, Carré, Littre, Boulet, …
Etc.
Mr Bernoully de Groningue a envoyé à l'Academie un …
paquet cacheté contenant les Problemes des Isoperimetres …
dont il sera fait mention quand les …
Solutions des mêmes Problemes de Mr Bernoully …
Basle sur Leur, auront été veu ce paquet …
aujourd'huy, et le garde par ordre de la Compagnie.
Mr Du Hôtel Chirurgien à l'hôtel Dieu m'a mis entre les …
mains son Ecrit ou je remarque differentes particularités …
ou curiosités d'Anatomie, entre autres les preparations Dont…

3. DANS LES PROCES VERBAUX des séances de l'Académie des sciences du 1er février 1701, il est fait mention du pli cacheté déposé par « M. Bernoulli de Groningue ». Jean Bernoulli y répond au problème des isopérimètres posé par son frère Jacques : rechercher la courbe fermée qui décrit la plus grande aire à périmètre égal, lorsque celle-ci passe par quatre points donnés qui ne sont pas sur un cercle. Ce pli témoigne de la rivalité entre les deux frères.

doute en être le plus près possible. Déjà en mauvaise santé, il a peut-être été animé par le souci de vite porter ses constatations à la connaissance du plus grand nombre, ce qui fit dire à un médecin qui suivait l'affaire, Géminien Luppi, que « par les efforts de M. Pasteur, quoique venu le dernier, tendant à vulgariser les idées de ses devanciers, toutes les sciences depuis six ou sept ans n'ont cessé de s'occuper de cette trouvaille ».

L'exemple suivant reflète la portée internationale de certains plis. En décembre 1846, l'Académie enregistre un paquet cacheté adressé par un Américain du nom de Charles Jackson. Dans le pli, ouvert le 18 janvier 1847, figure une découverte, celle de l'insensibilité produite par l'inhalation d'éther, constatée au cours d'interventions dentaires. Jackson encouragea ensuite l'extension du procédé à d'autres interventions plus conséquentes. Ce sont finalement deux personnages, Jackson et un dénommé William Morton, qui revendiquèrent la découverte et, en octobre 1849, à Boston, une première intervention importante fut réalisée sous éther par un autre Américain, John Warunt. S'appuyant sur l'information contenue dans le pli de Jackson, l'Académie attribua deux prix de médecine, l'un à Jackson et l'autre à Morton.

Parfois, le dépôt est lié à des circonstances locales et momentanées, attachées



4. DANS LE PLI N° 7299 DEPOSE LE 12 FEVRIER 1908 par un certain Charles Louis Legrand, on trouve la description d'un appareil d'aviation fondé sur le vol des coléoptères et sur la structure anatomique de ces insectes.

© Pour la Science - n° 432 - Octobre 2013

à des problèmes de personnes : tel auteur souhaite placer au secret ses idées pour les publier plus tard, lorsque, par exemple, la consécration sera venue. Ainsi, le médecin Duchenne de Boulogne, alors inconnu, avait l'idée d'explorer l'excitabilité musculaire chez l'homme, à l'aide de l'électricité amenée au contact d'un muscle donné, par des électrodes de sa conception. Grâce à ce dispositif, il put analyser les modalités de fonctionnement d'une série de muscles, notamment du visage, dans le cadre de consultations obtenues dans des services hospitaliers, en particulier à l'Hôtel-Dieu. À cette époque, « l'homme à la petite machine », tout juste toléré, souhaita mettre au secret ses idées et ses résultats, et ne les publia qu'après avoir acquis quelque renommée.

Etienne-Jules Marey, quant à lui, déposa en 1885 un pli à l'Académie afin qu'il protège exclusivement à l'armée française. Ce spécialiste de la photographie instantanée y décrivait des techniques originales pour « former des tireurs sur but mobile, c'est-à-dire dans des conditions pratiques de guerre ». Certains plis, enfin, révèlent de tragiques histoires, tel celui envoyé en 1940 par le mathématicien d'origine allemande Wolfgang Doeblin *(voir la figure 2)*.

À l'attaque du phylloxéra

La Commission des plis cachetés n'a pas uniquement eu à connaître des dépôts d'auteurs défunts ayant acquis la célébrité. Nombre de noms inconnus n'ont été rencontrés qu'un instant, au cours des séances du Comité des plis. Parfois, il s'agit d'un officier en retraite ; il s'ennuie, réfléchit et décide de reprendre ses compas, son T et sa règle, et de confier à la postérité l'épure du projet d'un dispositif nouveau, par exemple un système pour s'autodéplacer, de communication optique ou de perfectionnement du télégraphe, alors dans sa phase balbutiante. Un siècle plus tard, le pli, examiné avec une curiosité sympathique, est classé sans suite ou, au mieux, communiqué à un service spécialisé dans la muséologie technique, tel le Conservatoire des arts et métiers. Quels qu'ils soient, ces dispositifs n'ont presque jamais préfiguré l'évolution technique telle qu'elle s'est déroulée.

D'autres déposants, plus au contact des réalités de leur époque, ont tenté de proposer des solutions à divers problèmes. L'un des épisodes les plus poignants est sans aucun doute l'invasion de la vigne par le phylloxéra, il y a plus d'un siècle. L'abondance des plis sur ce sujet marque bien une préoccupation à l'échelle du pays devant les meurtrissures économiques créées par le fléau. Une foule de penseurs-chercheurs de tous horizons se sont employés à préconiser des solutions aussi variées que fantaisistes, mais un seul semble avoir proposé la solution qui a triomphé : la greffe de la vigne française sur des plants américains résistants. L'histoire est instructive à deux titres : d'une part, une fois encore, aucun des déposants n'a eu l'intuition de la bonne méthode ; d'autre part, elle dépeint une population d'obscurs savants qui pensaient avoir une vérité, n'avaient pas les moyens de la diffuser et ont éprouvé le besoin de prendre rang.

Au nombre de ces plis « banals » figure un autre ensemble, moins ciblé que celui du phylloxéra, mais tout autant lié à l'air du temps. À la fin du XIX^{e} siècle, les synthèses organiques se développent et il n'est

Charles Bertolus et la lampe incandescente

Concis et bien écrit, le pli 6319 envoyé le 25 février 1901 par Charles Bertolus, de Saint-Étienne, au secrétaire de l'Académie des sciences et ouvert par la Commission des plis cachetés le 28 janvier 2010, présente une idée intéressante : remplacer les filaments de carbone des lampes utilisées pour l'éclairage électrique par des métaux réfractaires, tel le tungstène. Les filaments de carbone ne supportant pas une température élevée, leur rendement lumineux était faible (quelques pour cent), la majorité de l'énergie étant émise dans l'infrarouge. Bertolus avait compris (sans en donner de justification physique claire) que pour augmenter le rendement de ces lampes à incandescence, il fallait élever la température d'émission. Il proposait donc d'utiliser des corps supportant mieux les hautes températures.

Si Bertolus avait continué ses recherches, aurait-il pu avoir la priorité dans la découverte des lampes à filament de tungstène, utilisées jusqu'à ces dernières années ? Pas sûr, car l'histoire des lampes à incandescence est aussi celle de batailles d'avocats pour la priorité en matière de brevets, guerre entamée dès les brevets des inventeurs Joseph Swan (1878), en Angleterre, et Thomas Edison (1879), aux États-Unis, pour les lampes à filament de carbone fait de bambou carbonisé.

Les premières lampes à filament de tungstène semblent avoir été fabriquées au tout début du XX^{e} siècle à Budapest, dans l'actuelle Hongrie, par une compagnie nommée *Tungsram*. Fondée en 1896, l'entreprise au nom évocateur (« Tungs » est le début de tungstène et « ram », la fin de Wolfram, nom allemand du même métal) proposa son premier brevet de lampe à filament de tungstène en 1903.

La principale difficulté, non évoquée dans le pli de Bertolus, était la fabrication de filaments fins de tungstène, métal cassant et rigide. Les Hongrois formaient ces filaments en recouvrant un fil de carbone avec du tungstène précipité et en évaporant ensuite le carbone par chauffage. La production en masse de filaments de tungstène et donc de lampes à incandescence de bon rendement n'a été possible qu'après 1910, grâce à l'idée d'un ingénieur de *General Electric*, William Coolidge : étirer les filaments de tungstène pour les amincir. Un peu plus tard, l'Américain Irving Langmuir eut l'idée de vriller ces filaments pour accroître leur rendement et la rigidité. En 1989, après de nombreuses péripéties, *Tungsram* a été incorporée dans *General Electric*.

La firme fondée par Bertolus, spécialisée dans les applications des métaux non ferreux, a quant à elle disparu au début des années 1950.

Ce pli est emblématique de la recherche appliquée et non « académique » qui fleurissait dans les plis cachetés du début du XX^{e} siècle. Son étude montre que cette recherche s'inscrivait déjà dans une compétition à l'échelle mondiale, au moins sur des sujets tels que les applications de l'électricité, alors à la pointe du progrès. Pour de tels sujets, il est bien difficile, sinon impossible, de se faire une idée de la distance séparant l'auteur du pli d'une prise de brevet qui lui aurait assuré un avantage sur ses concurrents. La recherche appliquée se pratiquait alors sans intervention de l'État et impliquait un vaste tissu d'entreprises privées (pharmacie, chimie, mécanique, etc.).

© Pour la Science - n° 432 - Octobre 2013

donc pas surprenant que beaucoup d'isolés – pharmaciens, ingénieurs souvent retraités, quelques rares universitaires – aient eu pour souci de confier un pli cacheté sur ce thème. À l'ouverture cependant, rares sont ceux qui ont retenu l'attention. Nombre de plis comportaient une erreur fondamentale, du fait des connaissances limitées de l'époque. D'autres décrivaient une méthode de synthèse chimique certes possible, mais dépassée. Dans certains cas, la méthode préconisée n'était pas fausse, mais le procédé avait été découvert juste après la date du dépôt. Dans ces cas favorables, mais rares, qui aurait pu reconnaître une antériorité ? Tout était depuis longtemps tombé dans le domaine public. Et qui, hormis les historiens, s'intéresserait à une antériorité lointaine ?

Depuis une cinquantaine d'années, une autre sorte de plis – volumineux, touffus, de contenu ambitieux – est apparue, qui a conduit à amender le règlement. L'auteur méconnaît ou rejette les avancées de la science contemporaine. Animé d'une idée, d'une théorie qui l'inspire, il élabore son propre système, sans tenir compte de faits établis ou de la simple logique. Il demande en général l'ouverture de son pli au bout de plusieurs années, dans l'espoir toujours vain de faire reconnaître ses travaux sans passer par des canaux de publication habituels.

Une absence de plis conceptuels

Pourquoi confier un résultat, une pensée, un nouveau dispositif technique au secret de l'Académie des sciences ? Pourquoi ne pas diffuser ses idées ou ses résultats ? Pourquoi les occulter un temps, et parfois pour toujours ? Il est curieux que, à part les écrits volumineux et récents de marginaux, peu de plis aient développé un point de vue conceptuel. Dans les années dont nous analysons aujourd'hui les dépôts (après le délai réglementaire de 100 ans), des discussions fondamentales animaient le monde scientifique, en physique comme en biologie, sur la structure de la matière ou l'évolution des espèces, par exemple. Les déposants auraient pu apporter une contribution critique sur ces spéculations théoriques. Or ils n'abordent presque jamais ces questions, leur préférant des sujets techniques ou appliqués. Est-ce le fruit du hasard ? L'appartenance socioculturelle des déposants a-t-elle été déterminante ? Aucune réponse évidente n'apparaît à l'étude des plis.

La motivation du dépôt n'est pas plus simple. On évoque celui qui veut flatter son ego en lançant, un peu comme une bouteille à la mer, ses idées qu'il estime nouvelles en direction d'une assemblée de haute compétence, avec le secret espoir (même à peine conscient) qu'il sera lu et, qui sait, immortalisé. Ou encore le savant reconnu qui souhaite mettre à l'abri, de manière plus formelle que dans ses dossiers personnels, des idées préliminaires ou des résultats encore douteux ; leur confirmation ou invalidation ultérieure lui ôte en général tout intérêt à demander l'ouverture de son pli.

Certains ont peut-être obéi à des impératifs plus concrets et matériels, en considérant que leur pli serait un élément décisif dans une future campagne de candidatures. D'autres se sont juste fait plaisir, en déposant, dans le sein d'une assemblée d'experts accueillante, un projet dont ils n'auraient su que faire. D'autres enfin se sont tournés vers l'Académie parce que leur manuscrit avait été refusé pour publication. Peut-être existe-t-il d'autres motifs encore. Entre une mise au secret utilisée comme moyen et une démarche gratuite, presque ludique, dont la finalité est difficile à cerner, connaîtrons-nous jamais la vérité ou, mieux, les vérités ? ■

5. TROIS PLIS DEPOSES SOUS FORME D'OBJETS : un flacon scellé, non ouvert, ayant un dépôt de nature non précisée (*à gauche avec sa boîte*, 1760), un succédané de café destiné à remplacer la chicorée (*au centre*, 1864) et de la théobromine cristallisée, un composant des graines de cacao, et donc du chocolat (*à droite avec sa boîte*, 1907).

LES AUTEURS

Edgardo D. CAROSELLA est président de la Commission des plis cachetés de l'Académie des sciences. Il a rédigé cet article avec Pierre BUSER, ancien président, en étroite collaboration avec Yves Pomeau, ancien président, Roger Balian, Yves Jeannin, Jean Normant et Jean-Paul Poirier, membres de la commission, et l'aide précieuse de Sabine Clabecq, des Archives de l'Académie des sciences.

A ECOUTER

Jeudi 26 septembre, Edgardo Carosella et Sabine Clabecq reviendront sur les nombreux trésors que recèlent les plis cachetés dans l'émission **La marche des sciences**, sur *France Culture*. **www.franceculture.fr**

BIBLIOGRAPHIE

J. Peiffer, **Jacob Bernoulli, maître et rival de son frère Johann**, *Journ@l Électronique d'Histoire des Probabilités et de la Statistique*, vol. 2, n° 1, juin 2006.

P. Berthon, **Les plis cachetés de l'Académie des sciences**, *Revue d'Histoire des Sciences*, vol. 39, pp. 71-78, 1986.

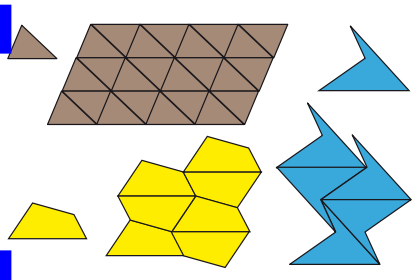
LOGIQUE & CALCUL

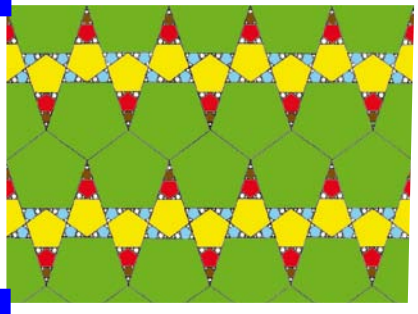
Les pavages pentagonaux : une classification qui s'améliore

L'énumération des pavés convexes pentagonaux a plusieurs fois été proposée. À chaque fois, elle s'est révélée incomplète. Heureusement, les amateurs s'en mêlent.

Jean-Paul DELAHAYE

Des énumérations de figures qui n'en finissent pas ; les travaux d'une mère au foyer qui perturbent les certitudes des mathématiciens professionnels ; un chercheur japonais qui progresse dans l'étude de l'énigme fondamentale des pentagones, mais ne parvient pas à la résoudre ; un passionné de casse-tête qui écrit un programme et améliore les résultats dans un domaine où, pourtant, de nombreux chercheurs ont tenté tout leur possible ; une infinité de figures optimales là où on n'en attendait qu'une seule. Voilà ce que réserve l'histoire et l'actualité de la géométrie des pavages pentagonaux.





1. ON PEUT PAVER LE PLAN (sans laisser de trous) avec n'importe quel triangle ou quadrilatère, convexe ou non *(a)*. Avec des pentagones réguliers, c'est possible, à condition d'accepter une infinité de tailles différentes *(b)*. Le « pavage du Caire » est obtenu avec un pentagone équilatéral *(c)*.

Trois, quatre ou cinq côtés

Les pavages du plan par des triangles équilatéraux, des carrés ou des hexagones réguliers sont familiers. Le fait que n'importe quel triangle et n'importe quel quadrilatère (convexe ou non) pavent parfaitement le plan *(voir la figure 1a)* l'est un peu moins. Une question vient immédiatement à l'esprit : et pour cinq côtés ? Autrement dit : peut-on paver le plan avec des pentagones, et si oui, comment ?

Pour le pentagone régulier – cinq côtés égaux, cinq angles égaux –, on y arrive... en acceptant de prendre des pavés de tailles de plus en plus réduites *(voir la figure 1b)*.

Nous nous interdirons cette astuce, car tout serait alors sans intérêt : on montre que n'importe quelle forme pave aussi le plan quand on accepte d'en prendre des copies de différentes tailles.

En cherchant à paver le plan avec des pentagones réguliers de même taille, on échoue. En effet, les angles intérieurs du pentagone font 108° (180° – 360°/5) ; il est donc impossible de placer un nombre entier de pentagones réguliers autour d'un point : en plaçant trois pentagones autour d'un point, on obtient 324°, ce n'est pas assez ; en plaçant quatre pentagones autour d'un point, cela donne 432°, c'est trop !

Tant pis pour le pentagone régulier, il y en a bien d'autres. Les paveurs de rue égyptiens savent qu'il existe des pentagones recouvrant le plan sans laisser d'espace vide. Le « pavage du Caire » est réalisé avec un pentagone équilatéral, dont les cinq côtés sont égaux, mais pas les cinq angles *(voir la figure 1c)*. Ce pentagone comporte deux angles de 90° et trois de 120°. C'est un pavé convexe : tout segment AB qui joint deux points A et B du pavé reste dans le pavé.

Trois questions de base

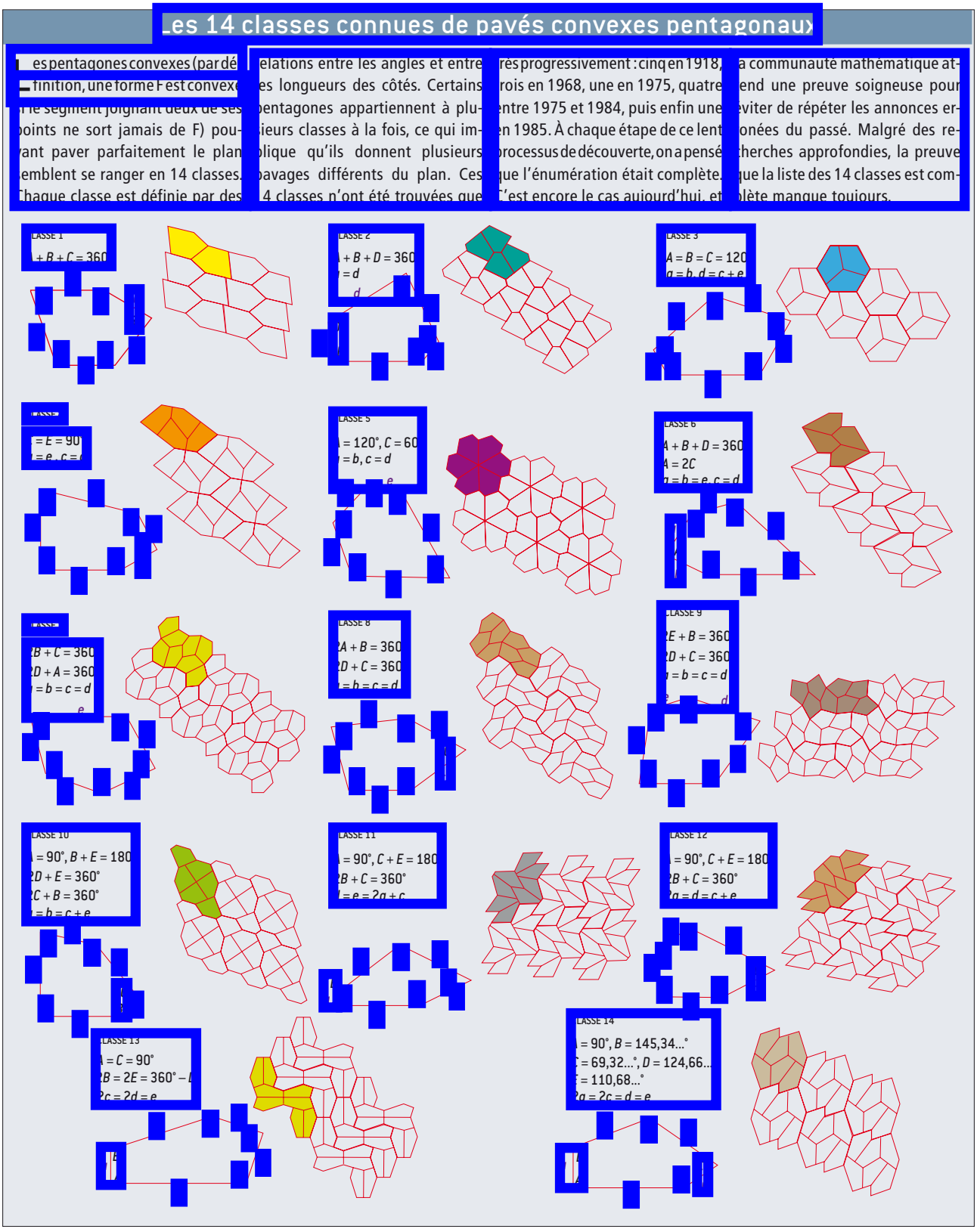
Les formes non convexes (tel le quadrilatère bleu de la figure 1a) compliquent la question des pavages du plan. Aussi, dans la plupart des problèmes, nous n'envisagerons que des pentagones convexes.

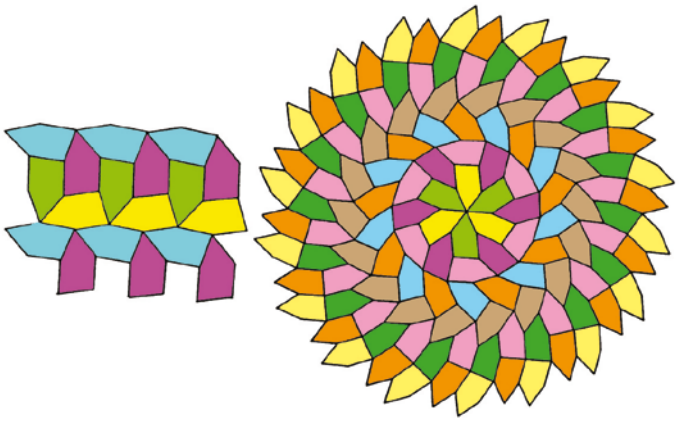
Trois types de questions principales se posent alors.

– Quels sont les pavés pentagonaux convexes qui autorisent au moins un pavage du plan ?

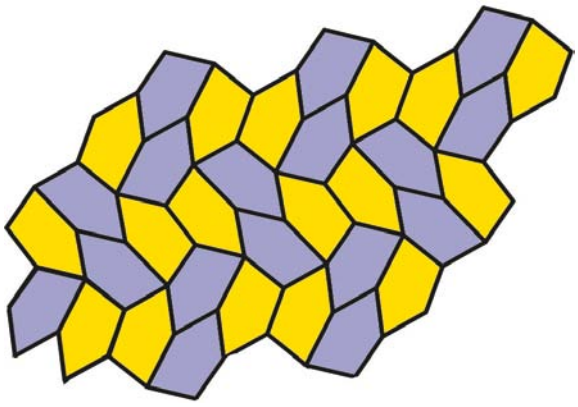
Les 14 classes connues de pavés convexes pentagonaux

Les pentagones convexes (par définition, une forme F est convexe si le segment joignant deux de ses points ne sort jamais de F) pouvant paver parfaitement le plan semblent se ranger en 14 classes. Chaque classe est définie par des relations entre les angles et entre les longueurs des côtés. Certains pentagones appartiennent à plusieurs classes à la fois, ce qui implique qu'ils donnent plusieurs pavages différents du plan. Ces 14 classes n'ont été trouvées que progressivement : cinq en 1918, trois en 1968, une en 1975, quatre entre 1975 et 1984, puis enfin une en 1985. À chaque étape de ce lent processus de découverte, on a pensé que l'énumération était complète. C'est encore le cas aujourd'hui, et rien ne prouve que la liste des 14 classes est complète.





2. L'UNIQUE PENTAGONE dont les angles vérifient les relations $A + 2B = C + 2E = A + C + 2D = 360°$ permet de construire plusieurs pavages différents, périodiques *(comme ci-dessus à gauche)* ou non *(comme ci-dessus à droite)*.



3. DANS CE PAVAGE, tous les pavés pentagonaux mauves ont un même positionnement relatif, et il en est de même pour les pavés jaunes, mais les mauves n'ont pas le même positionnement que les jaunes. Ce pavage est dit 2-isoédrique.

– Quels sont tous les pavages du plan réalisables avec les pavés pentagonaux convexes convenables (un même pavé conduit parfois à plusieurs pavages très différents) ?

– Quels sont les pavages du plan par des pentagones convexes d'aire unité les plus économiques, c'est-à-dire ayant un périmètre aussi petit que possible ?

Aucun de ces problèmes n'est facile. Si beaucoup de résultats produisant de magnifiques figures géométriques sont connus, plusieurs n'ont été obtenus que récemment et nombreuses sont les belles énigmes qui persistent en 2013.

Erreur sur erreur

Les mathématiciens sont têtus et sont parfois si persuadés qu'un problème est facile qu'ils croient disposer d'une solution, le disent et l'écrivent, et se trompent obstinément plusieurs fois de suite. Le problème des pavés convexes pentagonaux convenables est un exemple de cette suffisance.

En 1918, dans sa thèse soutenue à l'Université de Francfort, en Allemagne, Karl Reinhardt présente cinq classes de pentagones convexes qui pavent le plan *(classes 1 à 5 de l'encadré page 79)* et laisse entendre que prouver qu'il n'en existe pas d'autres est un travail fastidieux, mais facile. Pendant 50 ans, la communauté mathématique reste donc persuadée que le problème est résolu et sans intérêt.

Cependant, en 1968, Richard Kershner, de l'Université Johns Hopkins à Baltimore, reprend l'étude plus soigneusement. Il découvre trois nouvelles classes de pentagones convexes qui pavent le plan *(classes 6, 7, 8)*. Il écrit que c'est le manque de place qui l'empêche de détailler la preuve que les cinq classes précédentes et les trois qu'il vient de découvrir constituent la liste complète des pentagones convexes pavant le plan.

Quand, en juillet 1975, Martin Gardner présente les résultats de Kershner dans sa rubrique de jeux mathématiques du *Scientific American*, il reçoit une lettre de Richard James, informaticien californien, lui proposant une nouvelle classe *(classe 10)* qui montre que Kershner, comme Reinhardt avant lui, s'est trompé en croyant disposer d'une liste exhaustive.

Le plus étonnant reste à venir. L'Américaine Marjorie Rice *(voir l'encadré page ci-contre)*, mère au foyer qui lisait le magazine de son fils, y voit l'article de Gardner relatant la découverte de R. James. Elle se met à chercher seule de nouveaux pentagones convexes pavant le plan. M. Rice ne possède aucune formation particulière en mathématiques, mais son esprit systématique et un travail minutieux mené à l'aide de petits dessins la font découvrir quatre nouvelles classes oubliées par les professionnels *(les classes 9, 11, 12 et 13)*.

En 1985, une nouvelle classe est découverte *(classe 14)* par Rolf Stein, de l'Université de Dortmund. Il soutient qu'avec cette quatorzième classe, il complète définitivement l'énumération… avant qu'on découvre que sa démonstration d'exhaustivité est fausse. Personne depuis n'a osé avancer une démonstration…

La question de savoir si ces 14 classes sont les seules n'est pas résolue depuis plus de 25 ans : ce qui semblait un problème facile est maintenant considéré comme un défi sérieux.

En 2012, le mathématicien japonais Teruhisa Sugimoto a réussi, en même temps que la mathématicienne russe Olga Bagina, à prouver qu'il existe huit classes, pas plus, de pentagones convexes convenant à des pavages « côté-contre-côté », c'est-à-dire où deux pentagones en contact se touchent soit uniquement par un sommet, soit par un côté complet pour chacun.

Ces huit classes sont celles numérotées 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9 dans l'encadré. Les classes 3, 10, 11, 12, 13, 14 ne donnent jamais de pavages côté-contre-côté. Dans le cas de la classe 1, pour avoir des pavages côté-contre-côté, il faut ajouter la contrainte $a = d$; pour la classe 2, il faut ajouter $c = e$; tous les pentagones des classes 4 à 9 produisent des pavages côté-contre-côté sans conditions complémentaires.

Pavés équilatéraux

Un autre théorème a fait avancer nos connaissances sur les pavages pentagonaux convexes. Démontré (avec l'aide d'un ordinateur) en 1985 par Michael Hirschhorn et David Hunt, puis simplifié en 2004 par O. Bagina, le théorème stipule qu'un pentagone équilatéral pave le plan si et seulement

© Pour la Science - n° 432 - Octobre 2013

s'il appartient à l'une des trois catégories suivantes :

A) Deux angles adjacents ont une somme de 180°.

B) Deux angles non adjacents ont une somme de 180°.

C) Les cinq angles A, B, C, D, E vérifient les relations $A + 2B = C + 2E = A + C + 2D = 360°$.

L'unique pavé de la classe *C* est intéressant : il permet plusieurs pavages essentiellement différents, dont certains sont non périodiques *(voir la figure 2)*.

Pour l'instant, bien que l'on connaisse de nombreux pentagones non convexes qui pavent le plan, personne, autant que je sache, n'a proposé, même à titre de conjecture, une liste de tels pentagones qu'on puisse considérer complète.

Les trois classifications des pentagones convexes (dont deux sont définitivement établies) constituent une belle réussite et règlent presque le *Problème des pavés convexes pentagonaux convenables*. Cependant, un seul pavé est parfois utilisable de plusieurs façons pour recouvrir le plan, c'est-à-dire qu'il donne plusieurs pavages ne se ramenant pas les uns aux autres. Ainsi, les pavages de la figure 2 sont essentiellement différents, bien que construits avec le même pentagone. Sait-on classer les pavages pentagonaux convexes ? Comme pour les pavés, la réponse est double : oui dans les cas les plus contraints, non dans le cas général.

Pavages isoédriques

Le cas le plus contraint est celui où l'on impose aux pavés convexes du pavage d'être tous dans une même position les uns relativement aux autres. Pour comprendre ce que cela signifie, considérons le pavage de la figure 3, qui appartient à la classe 8 du recensement en 14 classes. Un pavé y a deux types de positionnement.

En effet, les pavés mauves n'ont pas le même positionnement que les pavés jaunes. On le voit par exemple en remarquant que les « pavés-maisons » jaunes ont sur un côté un « pavé-maison » à l'envers, alors que les « pavés-maisons » mauves n'en ont pas. En revanche, les « pavés-maisons »

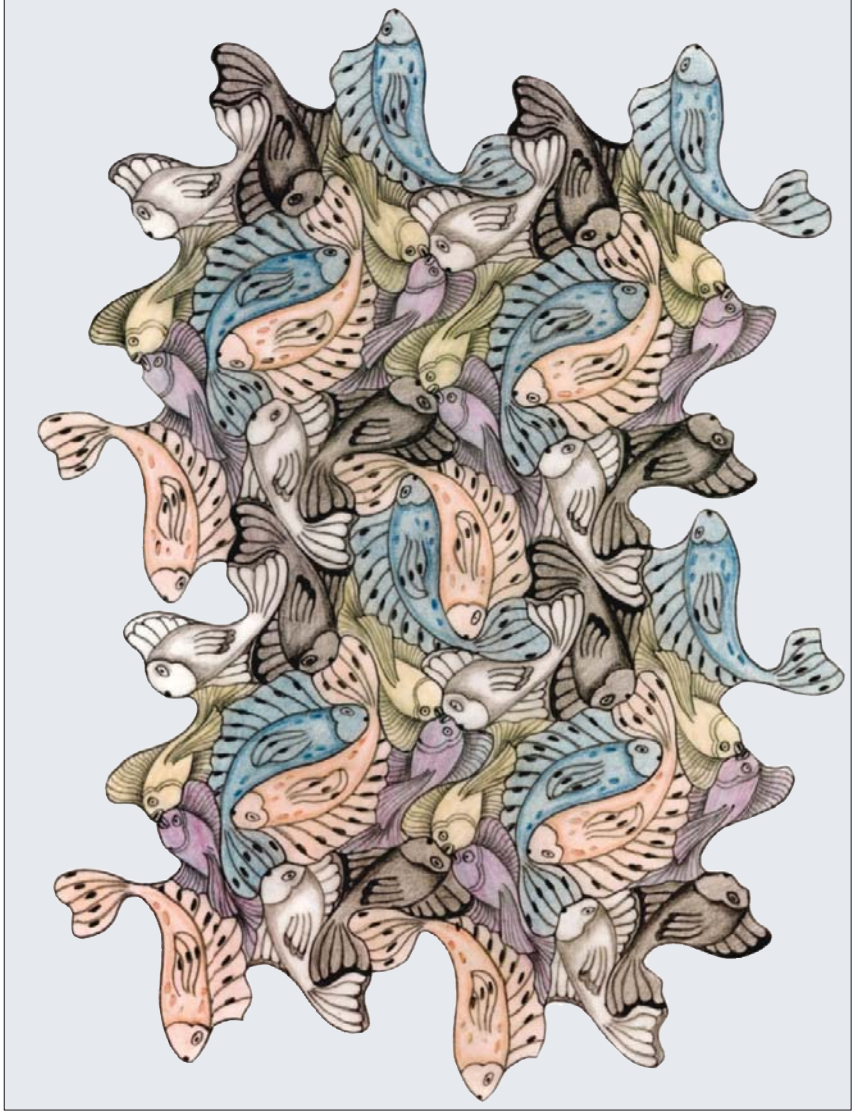
Talentueuse Marjorie Rice

Certains amateurs de mathématiques réussissent par fois de véritables exploits et donnent des leçons aux professionnels. Ces professionnels avaient été insouciants vis-à-vis d'un problème, la classification des pavages de pentagones.

Marjorie Rice, qui a 90 ans cette année, fait partie de ces amateurs. Elle écrivit :

« J'aime depuis toujours la nature, le dessin, les formes naturelles et leurs relations mathématiques. J'entrais dans le monde des pavages, il y a 26 ans, à la suite de la lecture d'un article de Martin Gardner trouvé dans la revue *Scientific American* de mon mari. Celle-ci déclencha en moi un vif intérêt pour les pavages et il n'a pas cessé aujourd'hui. L'article présentait des pentagones pavant le plan et demandait s'il en existait d'autres. J'ai toujours aimé les casse-tête et je me dis alors qu'il était peut-être possible pour moi de trouver de nouvelles solutions. J'entrepris de développer mes propres notations qui me permirent d'aborder de manière systématique le problème. » (http://tessellations.home.comcast.net/~tessellations/)

En plus de ces découvertes, s'inspirant des pavages décoratifs de Maurits Escher, M. Rice a dessiné ce pavage de poissons fondé sur la classe 2 de la liste des 14 classes connues de pavés pentagonaux convexes. L'entrevêtrement est ici particulièrement compliqué et difficile à déchiffrer pour celui qui ignore la méthode de construction.



mauves ont tous des positions équivalentes, et c'est vrai aussi pour les pavés jaunes. Pour ce pavage, il y a donc deux types de positions possibles pour le pavé pentagonal : un tel pavage n'est pas isoédrique, un pavage étant isoédrique lorsqu'il n'y a qu'un seul type de position pour le pavé, ce qui est le cas pour les pavages des classes 1 à 5 représentés dans l'encadré page 79.

En termes plus techniques, un pavage isoédrique est un pavage où les isométries du plan (translations, rotations, symétries et compositions de ces transformations) laissant invariant le pavage permettent de passer d'un pavé donné à n'importe quel autre. Autrement dit, un pavage est isoédrique quand tous les pavés se valent, aux isométries du pavage près.

Un beau et difficile théorème, démontré par Branko Grünbaum et Goeffrey Shephard en 1977, indique qu'il existe :
- 14 catégories de pavages isoédriques par des triangles,
- 56 pour des quadrilatères convexes,
- 24 pour des pentagones convexes
- et 13 pour les hexagones convexes.

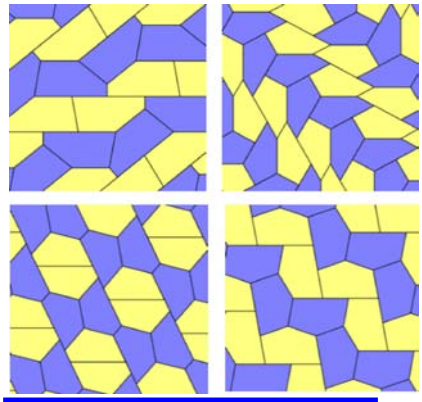
On sait par ailleurs, d'après un résultat démontré la même année par Ivan Niven, qu'il n'existe aucun pavage par un polygone convexe à k côtés lorsque $k > 6$. Cela règle définitivement la classification des pavages isoédriques par des polygones convexes : il existe 107 types de tels pavages.

Lorsqu'un pavage comporte deux types de positionnements de pavés, comme celui de la figure 3, on dit que le pavage est 2-isoédrique. Trouver toutes les catégories de pavages 2-isoédriques par des pentagones convexes est un problème difficile. C'est encore un amateur qui a, le premier, proposé une solution. Tout récemment, en programmant soigneusement une recherche systématique, le Néerlandais Jaap Scherphuis (qui est aussi un collectionneur passionné de casse-tête, voir www.jaapsch.net/puzzles/) a trouvé 97 classes de pavages par des pentagones convexes 2-isoédraux *(voir la figure 4 pour quatre d'entre eux)*.

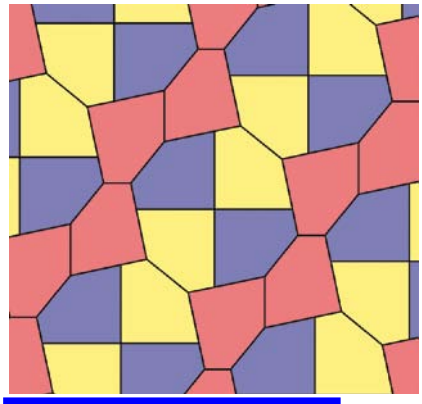
La liste de 97 pavages, qu'on trouvera sur www.jaapsch.net/tilings/, ne contient que des pavages où la proportion des pavés d'une couleur est égale à celle de l'autre couleur. Même si cela semble improbable, il se pourrait qu'il existe des pavages où ces proportions ne sont pas identiques. Si c'est le cas, l'énumération des 97 pavages de J. Scherphuis devra être complétée. Les résultats de cet amateur attendent confirmation. Qui saura démontrer que la liste des 97 pavages 2-isoédriques est complète ?

Il existe aussi des pavages 3-isoédriques du plan par des pentagones convexes : le pavé peut occuper trois types de positions différentes. C'est le cas du pavage, associé à la classe 10, représenté sur la figure 5. J. Scherphuis en propose bien d'autres.

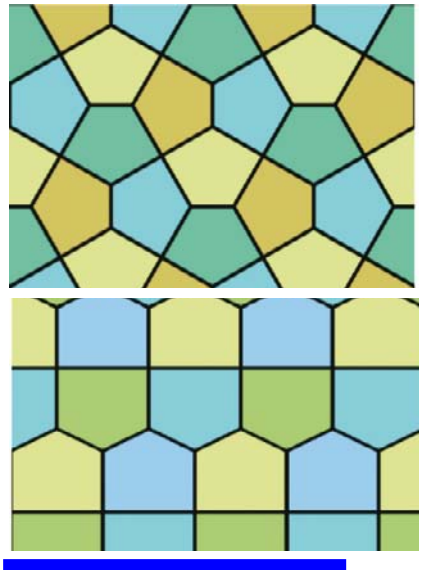
Une énumération complète de toutes les classes de pavages pentagonaux convexes (isoédriques, 2-isoédriques, 3-isoédriques, etc.) est un objectif qui apparaît pour l'instant hors de portée. Quand on aura réussi, il restera encore à envisager les pentagones non convexes. Voilà de quoi occuper les amateurs et les professionnels pour de longues années.



4. QUATRE PAVAGES 2-ISOÉDRIQUES
réalisés avec un pentagone convexe.



5. UN PAVAGE 3-ISOÉDRIQUE
réalisé avec un pentagone convexe



6. LES DEUX SOLUTIONS DE BASE
pour un pavage pentagonal optimal

Pavages optimaux

La troisième question centrale relative aux pavages pentagonaux est d'une nature un peu différente et, cette fois, elle est presque totalement résolue. Il s'agit du problème des pavages pentagonaux optimaux.

Les abeilles sont géomètres et ont choisi la forme de leurs alvéoles en utilisant un résultat mathématique qui n'a été démontré que récemment. Selon la conjecture des alvéoles d'abeilles, l'hexagone régulier d'aire unité est le polygone d'aire unité qui donne le pavage du plan le plus économique en longueur de périmètre. Cette affirmation, dont on trouve des traces chez le Romain Marcus Terentius Varro en 36 avant notre ère, semble presque évidente. Elle ne l'est pas du tout et n'a été démontrée qu'en 1999 par l'Américain Thomas Hales, connu aussi pour sa preuve de la conjecture de Kepler sur les empilements les plus denses de sphères.

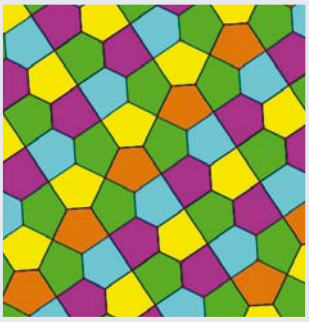
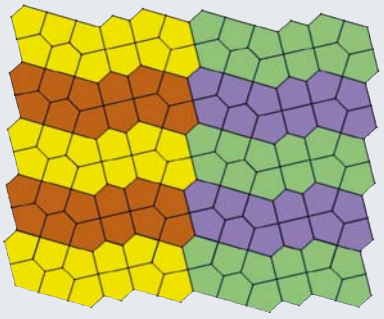
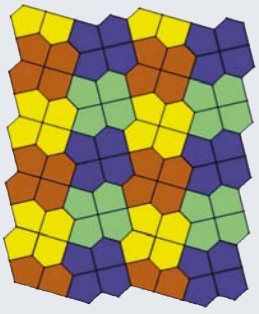
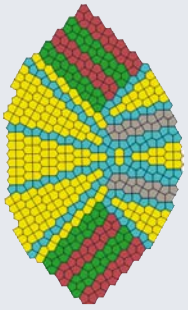
Si l'on s'impose de ne considérer que des pavages par des pentagones d'aire unité, se pose une question naturelle de même nature que celle résolue par Th. Hales : quel est le pavage optimal par des pentagones ? (Les

© Pour la Science - n° 432 - Octobre 2013

Une infinité de pavages pentagonaux optimaux

Si l'on veut paver le plan par des polygones d'aire unité et de périmètre aussi petit que possible, la solution est le pavage par des hexagones réguliers, comme les alvéoles d'une ruche. Cette optimalité du nid est soit une variante du pentagone du Caire, soit le pentagone en forme de petite maison décrit dans l'article. Le plus étonnant est que ces deux pentagones optimaux se combinent d'une infinité de façons différentes, conduisant à des pavages pentagonaux optimaux d'une remarquable variété.

Voici quatre de ces compositions optimales découvertes il y a trois ans par Ping Ngai Chung, du MIT, et ses collègues.

abeilles auraient dû résoudre cette question si les hexagones leur étaient interdits !).

La réponse a été publiée en 2012 par une équipe de mathématiciens réunis autour de Ping Ngai Chung, du MIT. Il y a une surprise : il existe plusieurs solutions optimales, alors qu'on n'en attendait qu'une seule.

Si l'on impose à tous les pavés du pavage d'avoir la même forme, il y a deux solutions *(voir la figure 6)* : une variante du pavage pentagonal du Caire et une variante du pavage pentagonal prismatique (cas particulier de la classe 1).

Le périmètre, pour une aire unité, de chacun de ces deux pavés est égal à : $2\sqrt{(2+\sqrt{3})} \approx 3{,}86$. C'est mieux que le périmètre d'un carré d'aire unité, qui est 4, mais c'est bien sûr un peu moins bien que le périmètre d'un hexagone régulier d'aire unité, qui est 3,81 (et qui, d'après le théorème de Hales, ne peut pas être battu).

Précisons que pour que les pavés pentagonaux soient optimaux, il faut prendre les longueurs des côtés des pentagones de manière à ce que ces derniers contiennent un cercle inscrit. Cela signifie en pratique qu'il faut introduire trois constantes pour décrire ces pentagones. La variante optimale du pentagone du Caire a un petit côté de longueur *a*, ses quatre autres côtés étant de longueur *b*. La variante optimale du pavage prismatique est telle que la longueur des côtés formant le toit est *a*, celle des murs est *b* et celle de la base est *c*, et tout cela avec :

$a = (2/3)\sqrt{(6-3\sqrt{3})} = 0{,}5977\ldots$,

$b = (3+\sqrt{3})(\sqrt{(2-\sqrt{3})})/3 = 0{,}8165\ldots$,

$c = 2\sqrt{(2-\sqrt{3})} = 1{,}0353\ldots$.

Ce qui a le plus surpris les chercheurs est que ces deux pavés optimaux se combinent et donnent d'autres pavages optimaux utilisant cette fois les deux formes pentagonales optimales dans des proportions variables. La variété des combinaisons est étonnante.

Concernant ce beau résultat, signalons que la démonstration proposée suppose que les pavés sont convexes. Tout le monde est persuadé qu'un pavé pentagonal non convexe ne peut pas faire mieux que les deux pavés trouvés (et leurs associations), mais cela n'est pas démontré.

Les recherches sur les pavages sont pleines de pièges. Qu'il ait fallu attendre 1999 pour que l'on démontre la sagesse instinctive des abeilles, qu'on ait pu se tromper si souvent sur l'énumération des classes de pentagones convexes (dont on n'a pas démontré qu'elle était complète), qu'on ne puisse énumérer les pavages pentagonaux non convexes, ou non isoédriques, voilà de quoi encourager l'humilité des mathématiciens, qu'ils soient amateurs patients, programmeurs experts ou théoriciens acharnés. ■

L'AUTEUR

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

BIBLIOGRAPHIE

J. Scherphuis, **Tilings**, 2013 : http://www.jaapsch.net/tilings

M. Rice, **Tessellations**, 2013 : http://home.comcast.net/~tessellations/index.htm

P. N. Chung *et al.*, **Isoperimetric pentagonal tilings**, *Notices of the AMS*, vol. 59(5), pp. 632-649, 2012

T. Hales, **The honeycomb conjecture**, *Discrete and Computational Geometry*, vol. 25, pp. 1-22, 2001.

B. Grünbaum et G. Shephard, **Tilings and Patterns**, W. H. Freeman & Company, 1987

D. Schattschneider, **Tiling the plane with congruent pentagons**, *Mathematics Magazine*, vol. 51, pp. 29-44, 1978.

SCIENCE & FICTION

Menaces invisibles

Les bactéries et les virus sont des micro-organismes invisibles à l'œil nu, mais dont les conséquences sont parfois dramatiques. Rien de tel pour stimuler les imaginations.

Jean-Sébastien STEYER et Roland LEHOUCQ

Quand la science-fiction met en scène l'extinction de l'espèce humaine, elle n'invoque pas uniquement le débarquement d'une armada extraterrestre, mais aussi l'invasion par des tueurs microscopiques, bactéries ou virus. Ainsi, le roman *World War Z* de Max Brooks (2006), récemment adapté au cinéma, met en scène un mystérieux virus transformant les humains en zombies. Dans notre monde, ces tueurs existent réellement et leur taille ne limite en rien leur capacité de destruction massive.

Le terme « bactérie » apparaît dans la littérature en 1828 avec le microbiologiste allemand Christian Ehrenberg. Ce dernier levait le voile sur un règne dont la masse est supérieure à celle de toutes les autres espèces vivantes ! Les bactéries sont les premières formes de vie apparues sur Terre et sont présentes partout : dans l'eau, l'air, le sol ou la glace. L'organisme humain héberge même dix fois plus de bactéries que de cellules : il y en aurait sans doute quelques milliers d'espèces, et elles pèsent environ un kilogramme chez un adulte ! Omniprésentes, elles sont aussi très résistantes : beaucoup sont extrêmophiles, capables de résister à des conditions extrêmes de température, pression, salinité ou acidité.

Deinococcus radiodurans, par exemple, résiste au dessèchement, aux rayonnements ultraviolets et ionisants, au vide ou encore à l'acide, et ce grâce à sa structure cellulaire particulière et à son système très efficace de réparation de l'ADN. Elle supporte aussi des doses de radioactivité 5 000 fois supérieures à celles qui tuent une cellule humaine.

Pourquoi s'intéresser aux bactéries ? Parce que certaines d'entre elles sont très dangereuses pour l'homme, comme l'ont montré pour la première fois Louis Pasteur et Robert Koch dès la seconde moitié du XIX^{e} siècle. Certaines bactéries sont responsables de graves maladies infectieuses, et avant l'invention des antiseptiques, désinfectants et antibiotiques, les bactéries faisaient des ravages. D'ailleurs, bien avant que leur nature réelle soit connue, elles furent utilisées comme arme de destruction massive : lors du siège de Caffa – aujourd'hui Féodosie, cité ukrainienne au Nord de la mer Noire – en 1346, l'armée tatare, alors atteinte d'une grave épidémie, catapulta les cadavres de ses soldats derrière les murs de la cité assiégée. Et avec eux *Yersinia pestis*, minuscule bacille (bactérie en forme de bâtonnet) responsable de la peste noire. Le bacille tua près de la moitié de l'Europe – 25 millions de personnes – entre 1347 et 1352.

Dans le *Retour du Roi*, troisième tome du *Seigneur des Anneaux* de J. R. R. Tolkien (1955), les Orques emploient la même technique en bombardant Minas Tirith de divers projectiles, dont les têtes de leurs victimes décapitées par leurs lames empoisonnées, alliant ainsi guerre bactériologique et psychologique. Héritée de la guerre froide, cette attirance mêlée de crainte pour les bactéries est d'autant plus marquée que ces micro-organismes peuvent vite échapper à tout contrôle ou tomber entre de mauvaises mains.

1. DANS LE FILM *WORLD WAR Z*, un virus rend violentes les personnes qu'il contamine. Les victimes de cette pandémie deviennent des tueurs. Jusqu'au moment où Brad Pitt décide de s'attaquer à la cause du mal...

© Pour la Science - n° 432 - Octobre 2013

2. LA TAILLE des organismes microscopiques n'est pas toujours un atout pour gagner. Le plus petit peut l'emporter… C'est le cas de ces nanovirus (en jaune orangé sur cette vue d'artiste).

Mais les virus sont encore, plus que les bactéries, les héros d'un genre à part entière, la science-fiction « horrifique » ou « apocalyptique » : dans *L'Armée des douze singes* (Terry Gilliam, 1995), les survivants d'une terrible pandémie envoient des prisonniers dans leur passé pour tenter de trouver l'antidote. En 1978, Stephen King met en scène dans *Le Fléau* un virus échappé d'une base de recherches de l'armée américaine et qui répand la mort.

Généralement plus petit qu'une bactérie, un virus est une entité dépourvue de noyau dont la capacité de reproduction et d'évolution est foudroyante. Mais, contrairement à une bactérie, un virus ne peut se reproduire de façon autonome. Il pénètre dans sa victime et détourne sa machinerie biologique à son profit et s'y multiplie. De surcroît, les virus peuvent rester dans un état de latence, durant lequel ils sont inoffensifs, se transmettre par l'intermédiaire des fluides vitaux – sang, salive ou sperme –, se propager et se « réveiller » brusquement. Ces scénarios intéressent les auteurs de science-fiction, par exemple dans *Alerte !* (W. Petersen, 1995) – où le virus mis en cause rappelle étrangement *Ebola* – ou *Contagion* (S. Soderbergh, 2011) qui traite surtout de la panique mondiale se propageant plus vite que le virus !

La fiction se nourrit de la réalité, mais certains faits divers dépassent la fiction. Ainsi, durant l'été 1999, un New-Yorkais rentre de voyage, ignorant qu'il a été piqué par un mous-

tique porteur d'un virus très dangereux, le virus du Nil occidental. Après avoir gagné le Queens, la souche partira, pour la première fois de son histoire, à l'assaut de l'Occident. Dans 80 pour cent des cas, le virus du Nil s'installe *incognito* dans l'organisme, créant une infection dite asymptomatique. Dans les 20 pour cent qui restent, les sujets souffrent de diverses infections, d'une pseudogrippe jusqu'à la liquéfaction de l'encéphale… Quant aux sujets infectés dans le film *28 jours plus tard*, ils se transforment quasi instantanément en zombies hyperactifs.

Un rôle dans l'évolution ?

Aujourd'hui, virus et science-fiction nous rappellent qu'*Homo sapiens* est avant tout *Homo vulnerabilis*, et que des virus apparaissent tous les jours, les plus connus étant le VIH, responsable du sida et apparu à la fin des années 1970, et H5N1, virus de la grippe aviaire, à l'honneur en 2004, car on craignait une pandémie. Enfin, les virus ne connaissent aucune frontière : la grippe de 1918, dite grippe espagnole, a été déclenchée par une souche particulièrement virulente et contagieuse qui s'est répandue dans le monde entier. Cette pandémie a fait au moins 30 millions de morts selon l'Institut Pasteur ; ce fut la plus mortelle de l'histoire en un laps de temps si court.

Quels sont les liens évolutifs entre l'homme et ces micro-organismes patho-

gènes ? Certains biologistes se demandent si notre espèce (et bien d'autres) ne serait pas apparue au cours de l'évolution… uniquement pour servir de support aux bactéries et aux virus ! Une idée qui se rapproche de celle du film *Phénomènes* (M. Night Shyamalan, 2008) où, pour se défendre contre les humains, les plantes développent un virus qui les pousse à se suicider en masse.

Ce concept de planète vivante capable d'autoréguler ses habitants est issu de l'hypothèse Gaïa, que le Britannique James Lovelock proposa en 1974. Il suggérait que la Terre est une sorte de superorganisme au sein duquel nous habiterions – un peu comme les bactéries et nous. Cela n'est pas sans rappeler *Matrix*, quand l'agent Smith dit à Morpheus retenu prisonnier : « Les humains s'installent pour se multiplier jusqu'à épuiser les ressources naturelles de l'endroit où ils vivent et leur seul espoir de survie, c'est de se déplacer jusqu'à un autre endroit. Il y a d'autres organismes sur la Terre qui ont adopté la même méthode, savez-vous lesquels ? Les virus. Les humains sont une maladie contagieuse, le cancer de la planète, ils sont la peste, et nous sommes le remède. » ■

J.-S. STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. R. LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay.

Retrouvez cet article sur www.boundscience.fr

ART & SCIENCE

Le crochet, le corail et la géométrie

La forme du corail est l'une des manifestations de la géométrie hyperbolique. L'un des seuls moyens de représenter concrètement les espaces correspondant à cette géométrie est une activité surannée : le crochet.

Loïc MANGIN

Le crochet a mauvaise réputation : cet avatar de la dentelle ne serait pratiqué que par des femmes, plutôt âgées, réunies dans des clubs. Cette image désuète est fausse, au moins en partie. Depuis quelques années, l'art du crochet est redevenu à la mode et l'on ne compte plus les blogs dédiés. Mieux, de la science se cache dans ces ouvrages en mailles qui ornent les fauteuils et le dessus des téléviseurs.

Cet aspect a été exploré en 2005 par Margaret et Christine Wertheim, fondatrices de l'*Institute for Figuring* (IFF), à Los Angeles. Cette institution promeut l'esthétique et les dimensions poétiques de la science et des mathématiques sans recourir à la manipulation de concepts abstraits.

Leur premier projet, nommé *Crochet coral reef*, fut la confection en crochet d'un récif corallien ! L'idée semble saugrenue, elle est pourtant pertinente. Voyons pourquoi. Dans le monde vivant, beaucoup de formes sont crénelées, dentelées, frisées... Citons les algues, les feuilles de laitue, les limaces de mer... et les coraux. Ces surfaces relèvent de la géométrie hyperbolique, l'un des trois types de géométries qui existent.

Une façon de les décrire est fondée sur le postulat des parallèles. Selon Euclide, par un point extérieur à une droite donnée ne passe qu'une parallèle à cette droite. Pendant quelque 2 000 ans, on a tenu ce postulat pour incontournable. Pourtant, au XIXe siècle, des mathématiciens (Riemann, Lobatchevski...) s'en sont affranchis. Dans la géométrie sphérique, le nombre de parallèles à une droite donnée est nul ; dans la géométrie hyperbolique, il est infini.

Ainsi, depuis des millions d'années, des organismes exhibent, souvent avec moult couleurs, des concepts découverts il y a moins de 200 ans ! Cependant, alors que les géométries euclidienne et sphérique sont facilement modélisables par un objet physique, respectivement un plan et la surface d'un ballon, la géométrie hyperbolique a longtemps résisté aux tentatives. L'idée est de représenter graphiquement et de façon cohérente une géométrie et ses propriétés.

Depuis des millions d'années, des organismes vivants exposent en couleurs des concepts découverts il y a moins de 200 ans

Pour la géométrie hyperbolique, la difficulté est telle que beaucoup en ont conclu que cette représentation était impossible.

Plusieurs modèles ont certes été proposés, par exemple celui de Klein-Beltrami et le disque de Poincaré (plusieurs œuvres d'Escher sont fondées sur cette représentation), mais ils restaient trop conceptuels. Le mathématicien William Thurston avait créé un modèle en papier, mais il était très fragile. Puis, en 1997, Daina Taimina, mathématicienne à l'Université Cornell, montra que le crochet pouvait relever le défi.

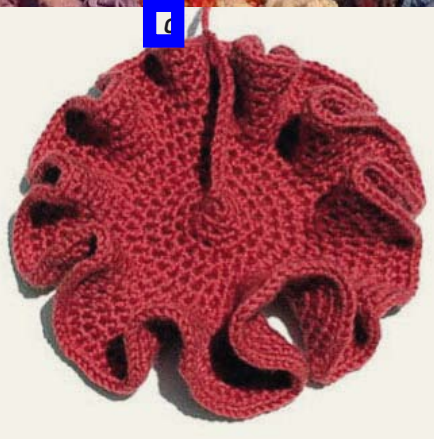
De fait, le principe du crochet, selon lequel on augmente progressivement le nombre de mailles des rangs, coïncide avec une propriété de la géométrie hyperbolique : la circonférence d'un cercle augmente de façon linéaire avec le rayon sur un plan euclidien, mais de façon exponentielle sur un plan hyperbolique. Ainsi, la géométrie hyperbolique, dont le corail est une des représentations, peut être confectionnée au crochet !

Plus encore, selon la règle suivie, on obtient des modèles différents. Par exemple, on augmente d'une maille à chaque rang dans la figure *b* et tous les trois rangs dans la figure *c*. La figure *d* montre des droites *(en vague)* cousues sur un plan hyperbolique.

Le projet de l'IFF a commencé par une petite annonce pour recruter des « crocheteurs ». Il a pris de l'ampleur et rassemble aujourd'hui des milliers de participants de par le monde. Le musée Andy Warhol, de Pittsburg, en Pennsylvanie, fut parmi les premiers intéressés par le projet : l'institution exposa un premier récif corallien en laine *(voir la figure a)* dans le cadre de son exposition consacrée au réchauffement climatique.

Puis ce fut Chicago, où une galerie de 300 mètres carrés fut remplie, ensuite New York, Londres... Aujourd'hui, le résultat de cette œuvre participative est visible à Denver et à Copenhague. À chaque fois, une antenne locale de l'IFF est créée afin de fédérer les bonnes volontés de la région. Le *Crochet coral reef* est sans doute devenu l'un des plus grands projets associant l'art et la science. ■

© Pour la Science - n° 432 - Octobre 2013



IDÉES DE PHYSIQUE

Être à la même heure que les autres

De la puce au Web, le développement des communications ultrarapides nous rappelle que mettre sa montre à l'heure est un problème… de relativité.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Les transactions financières, le transport aérien, certains calculs effectués par les ordinateurs, etc. exigent un temps extrêmement précis et fiable. Comment être certain d'avoir la même heure que les autres alors qu'ils sont distants et que les échanges d'informations se font, au mieux, à la vitesse de la lumière ? Si, dans l'imaginaire collectif, cela évoque l'instantanéité, nous avons tous aujourd'hui dans la poche ou sur le bureau des dispositifs assez rapides pour nous rappeler que cette vitesse a une valeur finie : en une nanoseconde, durée du cycle correspondant à une cadence de microprocesseur de un gigahertz, la lumière ne parcourt guère que 30 centimètres… Derrière les difficultés pratiques qui apparaissent se cache une question bien plus fondamentale : la synchronisation des horloges et la construction de l'espace-temps tel que l'a pensé Albert Einstein en 1905.

De la téléphonie GSM aux puces électroniques

Un premier exemple concerne la téléphonie mobile. Les téléphones GSM (pour *Global System for Mobile communications*) transmettent la voix numériquement codée sous la forme d'ondes radio, plus précisément des micro-ondes de fréquence 0,9 ou 1,8 gigahertz environ. Chaque téléphone s'adresse à l'antenne la plus proche, mais une antenne peut prendre en charge simultanément huit téléphones : sur une trame régulière de 4,615 millisecondes, chaque téléphone dispose tour à tour d'une fenêtre temporelle d'un huitième de cette période, soit 577 microsecondes *(voir la figure 1)*.

Pour un bon fonctionnement, il faut assurer la parfaite coordination temporelle des émissions et réceptions des informations entre l'antenne et les téléphones. Tant que les distances sont courtes, nul besoin de se soucier de la durée de propagation de l'onde radio entre le téléphone et l'antenne. Mais en zone rurale, lorsque les distances peuvent atteindre 30 kilomètres et plus, cette durée dépasse les 100 microsecondes, soit un cinquième environ de l'intervalle temporel disponible pour communiquer. Pour être à l'heure et éviter les chevauchements des créneaux, le téléphone doit ainsi envoyer son signal en avance. Ce délai est déterminé par le serveur de l'antenne émettrice, qui calcule la distance du téléphone en mesurant le temps des allers et retours des signaux.

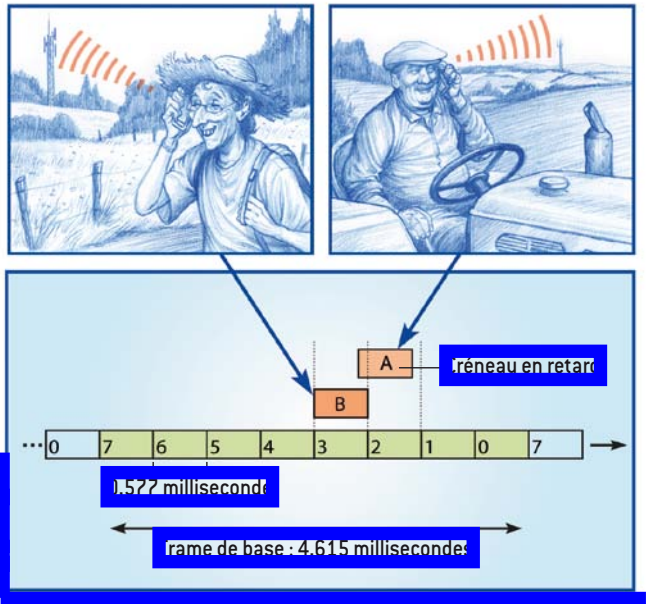
Dans les réseaux de télécommunication par fibres optiques, le problème devient encore plus sensible, car le débit de transmission et les distances parcourues sont plus grands. Fixer un même temps pour tous est analogue au problème de la coordination d'un grand nombre de gymnastes répartis dans un stade et devant effectuer un même mouvement. Comme il faut 0,3 seconde pour que le son parcoure 100 mètres, si tous les gymnastes suivent le tempo d'un même haut-parleur, le décalage entre eux sera visible. La solution est de multiplier les haut-parleurs de proximité.

De façon analogue, dans les réseaux, on équipe les nœuds principaux d'horloges atomiques extrêmement précises et stables dont l'information temporelle est transmise à des horloges dites esclaves. Ces dernières sont capables de régénérer cette information pour alimenter les horloges de niveau inférieur dans l'arborescence et continuer à fournir le temps exact si l'horloge primaire est en panne.

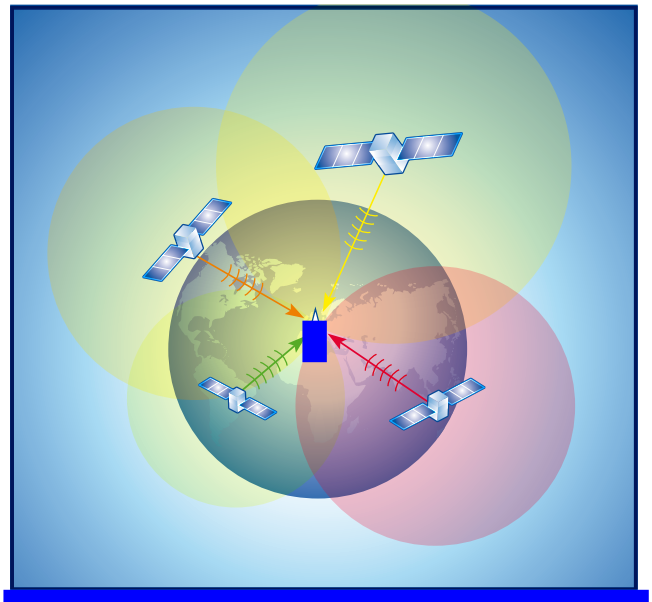
Il reste toutefois indispensable de mettre à l'heure les différentes horloges principales, c'est-à-dire de les synchroniser. Par ailleurs, si cette approche fonctionne dans un réseau organisé en étoile, elle devient plus problématique dans un réseau très ramifié tel qu'Internet, où la propagation peut passer par des chemins différents, avec des temps fluctuants de transfert entre nœuds. Cela impose des protocoles de communication de plus en plus élaborés.

Cette question de synchronisation se pose même à l'intérieur d'une puce électronique ou dans les gros supercalculateurs : en une nanoseconde, le signal électrique parcourt moins d'un centimètre à la surface d'une puce ; or il est essentiel que les signaux d'entrée d'un élément logique arrivent en même temps pour que les calculs s'effectuent correctement.

Derrière toutes ces questions pratiques ou techniques se pose une question fondamentale : comment définir un même temps pour tous ? Comment synchroniser des horloges localisées en des points différents de l'espace ? C'est par une telle réflexion sur le temps et l'espace que débute l'article d'Einstein de 1905 sur la relativité. Einstein constate que, en raison notamment de la valeur finie et absolue (indépendante de l'observateur) de la vitesse de la lumière, il ne peut exister un temps absolu. Einstein construit alors l'espace et le temps uniquement à partir d'objets physiques : des horloges et des ondes électromagnétiques.



1. DANS LE SYSTÈME GSM DE TÉLÉPHONIE MOBILE, chaque antenne peut prendre en charge les signaux de huit téléphones en même temps. À chacun de ces téléphones est attribué un créneau de 0,577 milliseconde (qui peut transmettre jusqu'à 148 bits d'information) dans chaque tranche temporelle de 4,615 millisecondes. La distance antenne-téléphone doit être prise en compte pour ajuster les instants d'émission. Sinon, le créneau d'un téléphone se trouvant par exemple à 30 kilomètres de l'antenne serait décalé, à la réception par celle-ci, de 0,1 milliseconde et chevaucherait le créneau suivant reçu d'un téléphone proche de l'antenne.



2. LA GÉOLOCALISATION PAR SATELLITES nécessite un ensemble d'au moins quatre satellites dont les horloges sont bien synchronisées. La mesure de la distance à trois satellites suffit en principe pour déterminer la position de l'appareil de localisation (P), mais la mesure de ces distances par P, déterminée par les durées des allers et retours des signaux, exige que P ait la même heure que les satellites. Or cet ajustement de l'horloge de P nécessite la présence d'un quatrième satellite : les quatre satellites fournissent ainsi les données requises pour déterminer les quatre coordonnées (trois d'espace, une de temps) de l'appareil P.

Ce que l'on nomme un référentiel d'espace-temps est ainsi une collection d'horloges identiques placées en chaque point de l'espace. Une horloge détermine sa distance avec ses voisines en mesurant la durée nécessaire à un signal électromagnétique, c'est-à-dire de la lumière, pour faire l'aller et retour, comme le fait une antenne GSM avec un téléphone mobile.

Le temps construit avec des objets physiques

Elles peuvent ensuite se synchroniser, toujours par échanges de signaux électromagnétiques : deux horloges A et B sont dites synchronisées si, lorsque l'horloge B renvoie à l'horloge A le signal reçu de cette dernière, l'heure t_B de ce renvoi selon l'horloge B est la moyenne de l'heure d'envoi t_A et de l'heure de retour t_A' sur la première horloge A (c'est-à-dire si $t_B = (t_A + t_A')/2$).

C'est cette philosophie de construction de l'espace-temps qui est mise en œuvre dans les systèmes de géolocalisation par satellites tels que le GPS américain ou le futur *Galileo* européen. Le référentiel GPS est ainsi construit à partir d'horloges atomiques embarquées dans une constellation de satellites et synchronisées, par la procédure décrite plus haut, avec des horloges de référence situées au sol.

Cependant, les horloges sont en mouvement et évoluent dans le champ de gravité de la Terre, ce qui modifie les rythmes relatifs et complique beaucoup la situation. En pratique, des corrections sont effectuées de telle façon qu'à chaque instant, l'heure indiquée par chaque satellite soit identique à l'heure qu'indiquerait une horloge immobile située au même endroit et en l'absence de champ de gravitation.

C'est ce système de référence temporelle qui, aujourd'hui, permet à chacun

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

Retrouvez les articles de J.-M. Courty et É. Kierlik sur
www.pourlascience.fr

BIBLIOGRAPHIE

. Kawalec, **Should we bother with the speed of light in everyday life ? A closer look at GSM technology**, *Physics Education*, vol. 47(5), pp. 579-583, 2012.

Ph. Matherat et M.-T. Jaekel, **Relativistic causality and clockless circuits**, *ACM Journal of Emerging Technologies in Computing Systems*, vol. 7(4), article 20, 2011 (http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00389739/fr/)

de se localiser facilement et rapidement, où qu'il soit. Chaque satellite émet régulièrement un signal daté. Notre récepteur, qu'il s'agisse d'un appareil dédié ou d'un téléphone mobile, compare cette heure avec l'heure de référence de son horloge et en déduit le temps que le signal a mis pour lui parvenir, donc la distance avec le satellite émetteur. En mesurant ainsi les distances qui séparent notre appareil d'au moins trois satellites, on détermine sans ambiguïté notre position sur la Terre (*voir la figure 2*).

Mais cela suppose que notre appareil soit synchronisé ! Or il ne dispose pas d'une horloge capable de conserver le temps à une dizaine de nanosecondes près (durée pendant laquelle la lumière parcourt trois mètres). En fait, on peut se contenter d'une horloge de qualité bien inférieure, à condition qu'elle soit mise à l'heure en permanence, en utilisant les signaux reçus des satellites. En un lieu et à un instant donnés de réception, il suffit d'utiliser les informations reçues de quatre satellites différents, soit quatre données, pour reconstituer les quatre coordonnées spatio-temporelles de l'événement de détection (trois coordonnées de position, une coordonnée de temps). En plus d'indiquer notre position, le système de localisation remet donc constamment à l'heure l'horloge de notre appareil et nous fournit ainsi l'heure « exacte ».

On le saura : la vitesse finie à laquelle se propage la lumière et la synchronisation des horloges sont, aujourd'hui, les deux mamelles de la communication et de la géolocalisation. ■

© Pour la Science - n° 432 - Octobre 2013

SCIENCE & GASTRONOMIE

Et si l'on utilisait des enzymes en cuisine ?

En ajoutant à nos mets des enzymes, nous pourrions par exemple leur conférer de la longueur en bouche.

Hervé THIS

Nous sommes au XXIe siècle et nous cuisinons presque comme nos ancêtres ! Alors que la biochimie a démontré l'importance des enzymes dans les transformations des tissus biologiques, la cuisine n'a pas fait beaucoup usage de ces outils, sauf à laisser des fermentations s'installer ou à coaguler du lait. Ne pourrions-nous pas exploiter les enzymes ?

Repartons du passé. Quand les populations humaines ont domestiqué des animaux, au Moyen-Orient, il y a 10 000 à 11 000 ans, elles étaient intolérantes au lactose, le sucre du lait : si les enfants produisaient une enzyme nommée lactase, qui décompose ce sucre, les adultes perdaient cette capacité. La transformation du lait en fromages ou en yaourts fut donc une découverte d'importance : la fermentation lactique transforme le lactose notamment en acide lactique, qui rend les gels laitiers digestes à tous ceux qui n'ont pas l'équipement enzymatique adéquat. Cette fermentation aide aussi la conservation des produits lactés.

Les techniques fromagères ont été étudiées en analysant des acides gras retrouvés dans des poteries anciennes, percées de petits trous qui contenaient des restes de matière grasse laitière (M. Salque *et al.*, *Nature*, vol. 493, pp. 522-525, 2013). Ces poteries semblent avoir été des faisselles.

Puis, il y a sans doute 7 500 ans, une mutation génétique s'est propagée en Europe, à partir de la Hongrie, permettant aux adultes de produire la lactase et, donc, de boire du lait. Cette mutation aurait augmenté d'environ 20 pour cent le succès reproducteur de ceux qui la portaient. Les traces de cette évolution se retrouvent aujourd'hui dans les gènes humains : contrairement aux habitants des autres régions du monde (sauf quand ils descendent d'émigrants), la plupart des Européens peuvent consommer du lait, et il se pourrait donc qu'une forte proportion d'Européens descendent des premiers fermiers capables de boire du lait.

Comment dépasser nos lointains ancêtres ? L'industrie du lait a remplacé la caillette (le quatrième estomac des ruminants) de veau par de la présure (substance extraite de la caillette), puis par l'enzyme peptidase qui y est présente. Cette enzyme déstabilise les micelles de caséine, formant un gel que l'on fait égoutter dans les faisselles. Aujourd'hui, on la fabrique par culture de micro-organismes génétiquement modifiés.

Pourquoi se limiter à cette première enzyme ? Ces dernières décennies, les industriels ont appris à produire une grande gamme d'enzymes, que l'on peut commander sur Internet. Par exemple, bien que nous sachions digérer le lait en Europe, pourquoi ne pas utiliser de la lactase afin de former glucose et galactose dans nos préparations culinaires ?

Certes, nous pourrions aussi employer directement du glucose et du galactose, mais l'emploi d'une enzyme est susceptible de réduire les coûts : les enzymes sont des catalyseurs, c'est-à-dire qu'une quantité infime suffit pour assurer une transformation importante.

D'autres enzymes, telles les amylases, pourraient avoir des actions plus élaborées. Une expérience a montré que des ultrasons appliqués à un récipient plein d'eau, auquel on a ajouté de l'amidon et des fullerènes (composés dont les molécules ne sont formées que d'atomes de carbone, insolubles dans l'eau), fait que l'amylose de l'amidon (un polymère linéaire dont les monomères sont des résidus de glucose) s'enroule autour des fullerènes et les solubilise; puis, si l'on crache dans la solution, les enzymes amylases de la salive humaine hydrolysent lentement les molécules d'amylose, ce qui libère lentement les fullerènes.

Pourquoi ne pas utiliser la même technique pour solubiliser des composés odorants qui se libéreraient ensuite sous l'effet d'enzymes ? Évidemment, il ne s'agit pas de cracher dans les plats, mais d'utiliser des amylases purifiées, disponibles dans le commerce. De la sorte, on pourrait donner à nos mets une odeur durable... ou bien d'autres propriétés inédites : les autorités sanitaires européennes ont établi l'innocuité alimentaire de nombre d'enzymes. ■

Hervé THIS est physico-chimiste dans le Groupe INRA de gastronomie moléculaire, professeur à AgroParisTech et directeur scientifique de la Fondation Science & Culture Alimentaire (Académie des sciences).

Retrouvez les articles de H. This sur www.pourlascience.fr

BIOLOGIE-NUTRITION

Les lipides

Claude Leray

Tec & Doc (Lavoisier), 2013
334 pages, 59 euros).

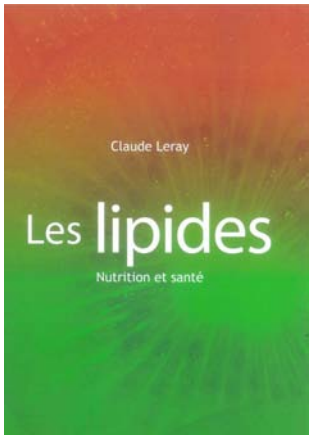
Depuis une dizaine d'années, les lipides sont en voie de redécouverte. Il était temps de bien identifier leurs rôles, tant ils ont été chargés de maux par la plupart des consommateurs ! Si l'apport énergétique reste l'une de leurs fonctions essentielles, on a aussi démontré qu'ils jouent de multiples autres fonctions, que ce soit dans les voies de signalisation intracellulaire, dans la modulation de l'expression de nombreux gènes, dans la régulation des mécanismes immunologiques, ou encore dans la synthèse d'hormones telles que les prostaglandines et les thromboxanes.

Tout cela implique que les lipides sont cruciaux dans l'apparition ou, au contraire, dans la prévention de bon nombre de pathologies. En fait, ils jouent un rôle stratégique dans les maladies cardio-vasculaires, dans l'obésité et le diabète, dans certains cancers, dans des maladies du système nerveux central et du cerveau, ainsi que dans certaines pathologies hépatho-digestives… Rien que ça !

Claude Leray, directeur de recherche au CNRS, a le mérite de nous rendre très accessible un domaine de plus en plus complexe à la suite de toutes les mises au point de ces dernières années. Partant d'un rappel historique sur la découverte des différentes classes lipidiques et de leurs utilisations (acides gras, cholestérol, vitamines liposolubles, phospholipides, sphingolipides, etc.), C. Leray nous propose une synthèse sur les besoins nutritionnels lipidiques de l'homme et, partant de là, sur l'impact potentiel de chaque classe lipidique sur les maladies dites de civilisation.

Cet ouvrage est donc fort bienvenu. Sa bibliographie récente et l'index qui le complètent seront bien utiles. Certes, face à la complexité du sujet et à son étendue, il paraît difficile d'en aborder tous les aspects de façon exhaustive. Mais la très relative modestie de l'ouvrage est à mettre à son crédit, car elle lui confère une qualité pédagogique dont les biologistes, les médecins, les nutritionnistes et les étudiants en biologie pourront tirer un grand profit.

Bernard Schmitt
CERNh, Lorien



BIOLOGIE-GÉNÉTIQUE

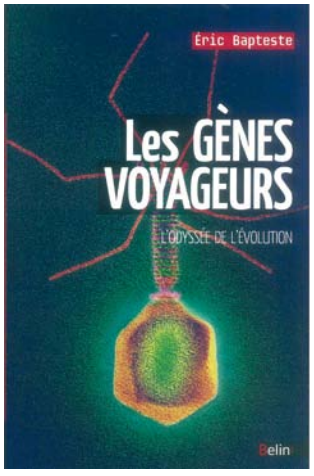
Les gènes voyageurs

Éric Bapteste

Belin, 2013
192 pages, 19,50 euros).

Il est rare qu'un ouvrage vous comble deux fois, et pourtant ! D'abord, celui-ci comble enfin une lacune de la vulgarisation sur les transferts de gènes entre organismes, transferts dont l'incroyable diversité dans la nature s'est révélée ces dernières années ; ensuite, on découvre que cet ouvrage, plein d'humour et d'images éclairantes, fait la synthèse de la recherche actuelle sur ce sujet.

La vision darwinienne classique envisage un arbre du vivant où de nouvelles espèces s'individualisent à partir d'une espèce ancestrale et où les gènes passent des ancêtres aux descendants. Or les espèces ne sont pas si individualisées et les gènes sont



souvent transférés entre elles. Virus, fragments d'ADN libres et une kyrielle de mécanismes très bien décrits dans l'ouvrage permettent à chaque organisme de recevoir de l'ADN… de tous ceux qui l'entourent. Rares pour une cellule donnée, ces échanges ne le sont pas à l'échelle globale : les virus marins transféreraient à eux seuls 10^{25} gènes par seconde ! Ces gènes importés permettent parfois l'adaptation des organismes à des conditions nouvelles et revêtent donc un rôle évolutif majeur. L'auteur inclut aussi dans son livre les associations symbiotiques, qui réunissent des organismes différents : en effet, que la symbiose soit héréditaire ou reconstruite à chaque génération (comme ces bactéries qui habitent nos cellules et y réalisent la respiration, les mitochondries, que nous héritons de notre mère), elle permet une utilisation indirecte de potentialités génétiques venues d'autres espèces.

Les organismes « flottent » donc sur un océan de gènes, qu'ils peuvent incorporer à tout moment. La conception classique d'une évolution en arborescence ne tient donc pas compte des voyages effectués par les gènes… ni de la nature composite des génomes ou des symbioses qui nous entourent. La conclusion de l'ouvrage, plus philosophique et épistémologique, encourage à diversifier nos représentations de l'évolution, sans rejeter les visions classiques. Le lecteur curieux regrettera que les notes, riches en précisions, soient placées à la fin, ce qui est une disposition fréquente mais peu commode. On eût aimé voir un peu moins de bactéries et plus d'exemples parmi les animaux ou les plantes. Mais ne boudons pas notre plaisir devant ce livre plein d'entrain, d'intelligence et de données, qui enrichit son lecteur.

Marc-André Selosse
MNHN, Paris

ESSAI

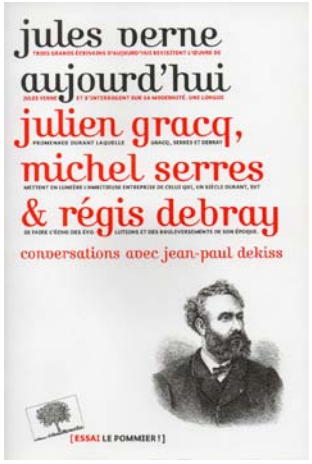
Jules Verne aujourd'hui

J. Gracq, M. Serres et R. Debray, conversations avec J.-P. Dekiss

Le Pommier, 2013
450 pages, 23 euros).

Julien Gracq, géographe et romancier, Michel Serres, philosophe, Régis Debray, médiologue, sont des lecteurs attentifs de Jules Verne, que Jean-Pierre Dekiss a interrogés entre 2000 et 2012. D'abord parus dans la revue *Jules Verne*, puis réunis ici, ces entretiens font revisiter Verne. Ils permettent aussi aux penseurs interrogés d'exposer des réflexions personnelles. Présentons quelques-unes des idées exprimées par ces auteurs.

© Pour la Science - n° 432 - Octobre 2013



J. Gracq conteste que Verne ait le goût de l'exotisme : il a une passion pour l'exploration, ce qui est autre chose. La recherche de l'exotisme est le fait de notre civilisation vieillissante, qui vit dans un monde désormais fermé et exploré. On va, en voyage plus ou moins organisé, visiter l'exotisme comme on va dans un musée ; on en revient ; on y retourne si on en a envie. Les héros de Verne, eux, ne savent pas ce qui les attend. Fascinés par le merveilleux, par la révélation, ils subissent le choc de la découverte. Leur attitude faustienne est typique de la civilisation européenne de l'époque.

« Sans les trois voyages par l'espace du monde, l'encyclopédie des sciences et le genre humain, pas de philosophie », dit M. Serres, et on comprend son attachement à Verne, dont les héros font ces trois voyages. M. Serres a, comme Verne, été marin, et il a une remarque surprenante : la mer réunit ce que les continents séparent. Le voyage par terre accumule les difficultés, celui par mer offre moins d'obstacles. Les ports sont plus proches les uns des autres que ne le fait croire la carte. Ainsi, Bordeaux a tissé plus de liens avec des ports anglais, portugais, hollandais, danois, qu'avec Toulouse !

Ce phénomène trouve un écho très actuel. Qu'est-ce qui s'ouvre quand on allume l'ordinateur ? Le navigateur. Dans l'espace virtuel, le navigateur rapproche les interhautes comme la mer rapproche les marins.

R. Debray marque plus de distance vis-à-vis de Verne. Il critique son progressisme. Verne croyait que le progrès technique engendre le progrès moral et politique. L'histoire du XX[e] siècle renvoie cette conception au musée des illusions. Le progressisme confond temporalité technique et temporalité culturelle. La temporalité technique est cumulative, irréversible (on ne repasse pas du tracteur à la charrue). La technique unit les hommes, parce qu'un objet technique peut circuler partout. Mais le fait culturel – en premier lieu, la langue – les divise. Variable dans l'espace, il est à peu près invariant dans le temps. « Plus l'univers des objets et des appareils se mondialise, plus le monde des sujets et des humains se tribalise ».

Montrer comment Verne stimule trois intelligences aussi différentes lui rend un bel hommage.

→ Didier Nordon

→ ARCHÉOLOGIE URBAINE

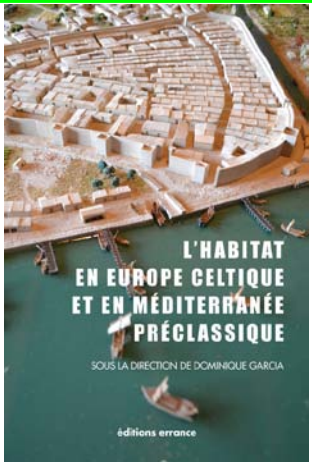
L'habitat en Europe celtique et en Méditerranée préclassique

Dominique Garcia (dir.)
Errance, 2013
(200 pages, 30 euros).

Cet ouvrage présente l'état le plus récent des réflexions sur l'habitat antique de la Méditerranée et de sa périphérie. Compte rendu d'un séminaire tenu à Aix-en-Provence en 2012, il concerne à parts égales l'habitat protohistorique ibérique ou gaulois et le monde préclassique étrusque, égéen ou homérique. Le lecteur peut ainsi confronter des approches et des contextes variés, tant sur le plan des aires culturelles examinées que sur l'arrière-plan théorique de l'habitat et de l'urbanisation.

Il apparaît ainsi que l'on est désormais bien loin de l'opposition cité classique-barbares. Les chercheurs tentent aussi de dépasser l'opposition ville-campagne, même si certaines communications associent l'urbanisation et la naissance de l'État-Nation.

Les témoignages littéraires sont analysés séparément des données archéologiques. Un choix judicieux, tant ces deux niveaux d'appréhension du fait urbain sont souvent difficiles à corréler. Les références à des modèles évolu-



tionnistes, géographiques, sociologiques sont nombreuses et parfois contradictoires. Personnellement, nous avons préféré l'analyse critique d'exemples concrets, parce qu'ils montrent que la réunion dans un espace restreint de plusieurs familles, voire de gens qui ne se connaissent pas, relèvent avant tout d'une décision politique dans une conjoncture historique particulière. S. Fichtl oppose ainsi

Brèves

Gérald Hess
PUF, 2013
(424 pages, 29 euros)

Ce livre, une première pour le public francophone, introduit le lecteur à l'éthique environnementale, objet d'étude académique depuis les années 1970, et présente les différentes postures morales vis-à-vis des problématiques écologiques ou environnementales. Avec beaucoup de clarté, l'auteur décrit les idées de la nature et de ses valeurs, ainsi que les théories éthiques que la crise écologique de la seconde moitié du XX[e] siècle a suscitées. Un ouvrage appelé à devenir une référence.

Claude Bernard La méthode de la physiologie

F. Duchesneau, J.-J. Kupiec et M. Morange (sous la dir.)
Rue d'Ulm, 2013
(166 pages, 12 euros).

Le médecin et physiologiste français Claude Bernard, dont on célèbre cette année le bicentenaire, est surtout connu pour avoir posé les fondements de la méthode expérimentale en sciences de la vie. Historiens de la biologie, philosophes, épistémologues, les auteurs de cet ouvrage lui rendent hommage en montrant comment ses idées sur la méthode, mais aussi sur la vie, la physiologie ou l'hérédité peuvent, aujourd'hui encore, nourrir les réflexions des biologistes.

Les nouveaux guérisseurs

Laurent Pordié et Emmanuelle Simon (sous la dir.)
EHESS, 2013
(302 pages, 22 euros).

Le terme guérisseur évoque l'image d'un sorcier soignant son peuple selon des traditions ancestrales transmises dans le plus grand secret. C'est pourtant un tout autre portrait que révèle cet ouvrage. À travers divers exemples en Afrique et en Asie, les auteurs, anthropologues, montrent que, loin d'être isolés du monde moderne, les guérisseurs d'aujourd'hui y recherchent une validation scientifique de leurs pratiques ou de nouvelles idées, devenant des acteurs non négligeables des pratiques sanitaires de ces régions.

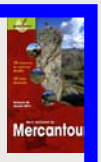
Brèves

La faim du pétrole

P. Mauriaud, P. Breton et P. De Wever
EDP Sciences, 2013
(224 pages, 19 euros).

Quelles ressources énergétiques exploiterons-nous à l'avenir ? Partant de cette question rebattue, les auteurs, géologues – l'un académique, les autres ingénieurs chez *Total* –, dressent un panorama original de cette question à travers l'histoire d'une des ressources majeures actuelles, le pétrole. Histoire de sa formation et de son exploitation par l'homme, considérations économiques et climatiques, état des lieux des autres sources d'énergie possibles s'articulent de façon claire et didactique sans éluder les questions épineuses telles que les jeux de pouvoir, les pollutions ou le cours du baril. Un ouvrage qui invite à la réflexion.

Parc national du Mercantour



M. Corsini, J.-M. Lardeaux et P. Tordjman
Omniscience/BRGM, 2013
(240 pages, 24,90 euros).

Le parc national du Mercantour, à la frontière franco-italienne, est une région fascinante. Ses paysages, sa faune, sa flore sont de toute beauté. Ce guide propose dix randonnées documentées (durée, difficulté, refuges…) pour découvrir les trésors du Mercantour. À travers ces parcours, c'est l'histoire géologique de la région qui est décryptée. Les photographies ne donnent qu'une envie, enfiler les chaussures de randonnées pour voir de ses propres yeux cette contrée avec ses karsts, ses cirques et bien d'autres merveilles.

Les invasions biologiques

Jean-Claude Lefeuvre
Buchet-Chastel, 2013
(292 pages, 20 euros).

L'homme, grand voyageur, a, volontairement ou non, emmené avec lui des végétaux et des animaux. Ces derniers se sont installés dans des milieux au détriment des espèces autochtones. L'auteur, président du Conseil scientifique du Conservatoire du littoral, fait ici le constat de ces migrations et du danger pour la biodiversité qu'elles représentent. Comment faire face ? L'auteur expose l'état de l'art en matière de recherche et de lutte contre le phénomène coûteux pour la société.

clairement les agglomérations, pour des raisons pratiques, des artisans des III^e^ et II^e^ siècles avant notre ère en Europe tempérée sur des carrefours fluviaux ou routiers, aux vastes *oppida* fortifiés de la génération suivante, fondés volontairement sur des hauteurs par les élites politiques et religieuses. R. Plana-Mallart insiste au contraire sur l'importance du périurbain et des liaisons étroites entre ville et campagne dans le monde antique. V. Adrymi-Sismani décrit trois petites villes mycéniennes dressées à quelques kilomètres les unes des autres et contrôlant un port commun. D. Isoardi tente une analyse « archéo-démographique » des habitats groupés entre le delta du Rhône et Massalia du VII^e^ au I^er^ siècle avant notre ère, qui démontre, entre autres, la fugacité des activités proprement urbaines dans ces habitats de surface et de population modeste. Un ouvrage qui oblige le lecteur à s'ouvrir et à reconsidérer les données concrètes sans *a priori*.

→ Olivier Buchsenschutz
CNRS et Archéologie d'Orient et d'Occident, ENS, Paris

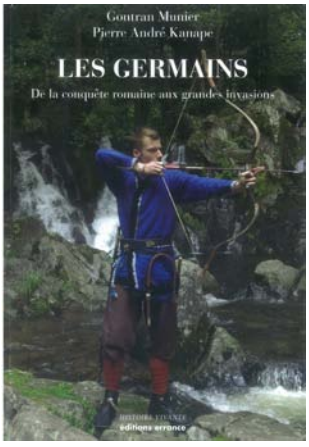
→ ARCHEOLOGIE

Les Germains

Gontran Munier et Pierre-André Kanape
Errance, 2013
(96 pages, 22 euros).

Ce petit livre ne manque pas d'atouts. D'abord, il s'insère dans la série des ouvrages d'archéologie expérimentale : des groupes d'hommes se confectionnent des vêtements et des armements anciens pour voir comment ils étaient utilisés dans la vraie vie. Ensuite, les auteurs ont eu une bonne idée. Chaque personnage photographié, un soldat normalement, est accompagné par la description de son armement. Et, pour présenter la civilisation des Germains, ils ont découpé le récit en courts paragraphes joints à chaque image ; le récit est donc plus léger. Cette répartition de la matière n'en aboutit pas moins à bien montrer que les Germains n'étaient pas des sauvages, même s'ils étaient des barbares, c'est-à-dire des hommes ne parlant pas latin, et carrément cruels. Leur vie était réglée par des institutions, ils honoraient des dieux, ils entretenaient des relations diplomatiques avec leurs voisins et ils rédigeaient des traités ; ils ont su élaborer une culture, purement germanique d'abord, germano-romaine ensuite.

Feuilletons l'ouvrage. On commence par la photographie d'un noble chérusque, le peuple qui a formé le cœur du dispositif anti-romain au Teutoburg, en 9 de notre ère. Puis un pillard sicambre est accompagné par un paragraphe consacré à la question des sources. Avec l'éclaireur chauque, c'est le système défensif des Romains, le pseudo « limes », qui est abordé ; avec le guerrier angle (ancêtre des Anglo-Saxons), ce sont les rites sacrificiels ; avec le fédéré en garnison à Aquilée, le recrutement ; avec les cataphractaires ostrogoths (curieusement joué par une dame ; une Ostrogothe ?), la cavalerie. Avec le chef burgonde, on trouve un passage sur les traités ; avec le guerrier franc, l'administration. Une remarque à propos des Francs : il nous semble que leur angon, une lance, était pourvu d'un arrêtoir, destiné à empêcher le fer de s'enfoncer trop profondément dans le corps de l'ennemi, car il était difficile ensuite de le retirer. Un porte-enseigne ostrogoth amène une description de la culture romano-gothique. Enfin, un noble franc de Tournai ouvre la voie aux royaumes barbares.



Le sous-titre « De la conquête romaine aux grandes invasions » est un peu étonnant, puisque les Germains ont réussi à éviter la conquête grâce à la « bataille » du Teutoburg. Il faut sans doute entendre « conquête romaine de la Gaule ». Dans la bibliographie, la présence de références aux Alains et aux Sarmates surprend également, puisque ces peuples étaient proches des Iraniens ; nous regrettons, en outre, l'absence dans la bibliographie du meilleur livre consacré aux guerriers germains : *Ancient Germanic Warriors*, publié par Michael Speidel en 2004. On nous pardonnera cette petite note de cuistrerie, inévitable chez un universitaire, et qui ne doit pas gâcher le plaisir pris à lire un ouvrage agréable et utile.

→ Yann Le Bohec
Professeur émérite de l'Université Paris IV-Sorbonne

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 – Octobre 2013 – N° d'édition 022432-01 – Commission paritaire n° 0912 K 82029 – Distribution : NMPP – ISSN 0153-4092 – N° d'imprimeur 1017184226 – Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé

Avec plus d'1 million de Sociétaires, on peut déplacer des montagnes

Quand une banque tire sa force de l'esprit coopératif, elle s'appuie sur des valeurs de solidarité, d'écoute et de confiance. *Créée par des enseignants, la CASDEN s'engage ainsi auprès de plus d'un million de Sociétaires à réinvestir leur épargne dans le financement des projets de chacun.*

Rejoignez-nous sur **casden.fr** *ou contactez-nous au* **0826 824 400***

Accueil téléphonique ouvert de 8h30 à 18h30 du lundi au vendredi (0,15€ TTC/min en France métropolitaine)

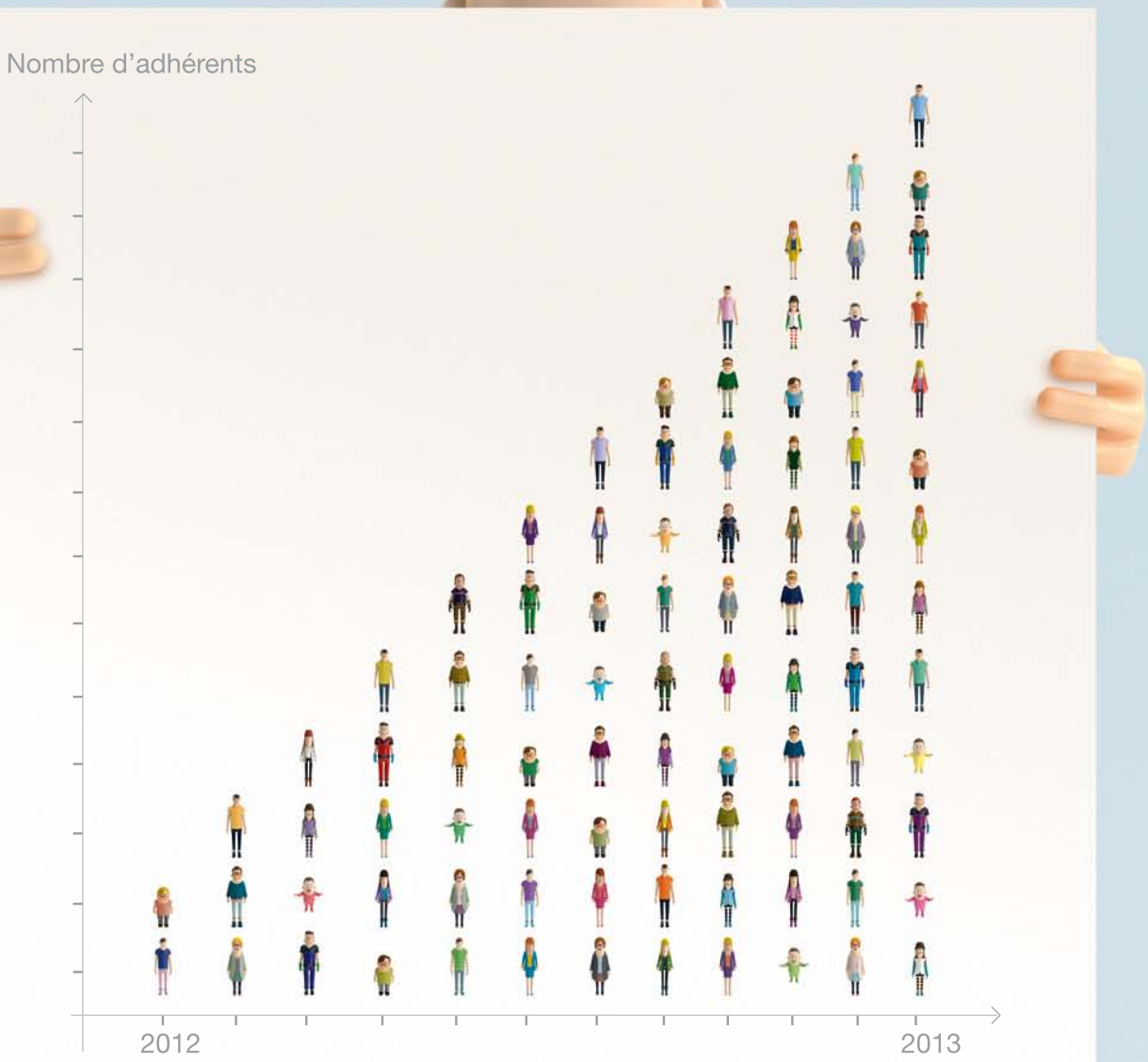
BANQUE POPULAIRE

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

TBWA\PARIS



150 nouveaux adhérents GMF chaque jour, qu'attendez-vous pour les rejoindre ?

Sur le terrain de la compétition, la GMF est fière de ses performances et affiche ses résultats : des adhérents toujours plus nombreux et satisfaits. Pas de formule magique, juste une éthique : être pour chacun de nos clients, toujours plus performant et innovant afin de garantir à tous une solution sur mesure. Cet engagement, vous pouvez le vérifier en comparant votre assurance, vos produits d'épargne ou de prévoyance lors d'un bilan conseil personnalisé avec l'un de nos conseillers. Une rencontre où nous prendrons d'abord le temps de vous écouter. C'est ça une bonne assurance.

Renseignez-vous au **0 970 809 809** (numéro non surtaxé)
ou sur **www.gmf.fr**

GMF
Assurément Humain

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