LE BONHEUR : selon quels critères le mesurer ?

POUR LA SCIENCE

Juillet 2013 - n° 429

www.pourlascience.fr

Edition française de Scientific American

L'intelligence des abeilles

Elles savent même compter !

Le Colisée : une géométrie optimale

Les tricots mathématiques

Les métaux étranges et la théorie des cordes

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

ENDNOTE®

NOUVELLE VERSION

X7

N'importe où, n'importe quand..

RECHERCHEZ
ORGANISEZ
RÉDIGEZ
PARTAGEZ

À PARTIR DE
95€ HT

Disponible pour Windows

Prochainement disponible pour Macintosh

LE MEILLEUR GESTIONNAIRE POUR VOUS ACCOMPAGNER DANS VOTRE TRAVAIL AU QUOTIDIEN.

EndNote simplifie la gestion de votre bibliographie en vous donnant accès aux meilleurs sources d'informations disponibles. Il facilite la collaboration entre collègues et permet en quelques clics de rendre des documents textes d'une qualité exceptionnelle.

NOUVEAU avec ENDNOTE X7

1) Dossier prédéfini par l'utilisateur sur l'ordinateur permettant l'import automatique de PDFs.

2) Groupes contenant des PDFs sont importés automatiquement de façon organisée (avec les mêmes noms) dans EndNote.

3) Ajoutez des citations et une liste de référence à vos diapositives PowerPoint (disponible uniquement sous Windows).

4) Ajoutez des en-têtes à votre bibliographie dans Microsoft Word en utilisant vos propres catégories ou celles prédéfinies par type de référence.

5) Utilisez la fonction Sync améliorée qui travaille en tâche de fond de façon à sauvegarder votre travail en continu et à le rendre disponible online ou sur votre iPad. Identifiez très rapidement les groupes que vous partagez en ligne (EndNote Web) à partir de votre bibliothèque EndNote.

Laissez vous tenter par ENDNOTE X7.
Vos documents seront tout simplement mieux organisés et plus faciles à gérer.

www.ritme.com/endnote

RITME - Distributeur Officiel • 34, bd Haussmann • 75009 Paris • France
Tél. : +33 (0)1 42 46 00 42 • Fax : +33 (0)1 42 46 00 33
info@ritme.com • www.ritme.com

Sauf indication contraire : logiciel et documentation en anglais, et livraison par téléchargement ou par CD-Rom
© Copyright 2013 RITME. EndNote est une marque déposée de Thomson Reuters.
Toutes les marques déposées sont la propriété de leurs sociétés respectives.

RITME
NOTRE MÉTIER : FACILITER LE VÔTRE
Distributeur officiel en France

POUR LA
SCIENCE

www.pourlascience.fr

8, rue Férou - 75278 Paris cedex 06
Standard : 01 55 42 84 00

Groupe POUR LA SCIENCE
Directrice de la rédaction : Françoise Pétry
Pour la Science
Rédacteur en chef : Maurice Mashaal
Rédacteurs : François Savatier, Marie-Neige Cordonnier, Philippe Ribeau-Gésippe, Guillaume Jacquemont, Sean Bailly
Dossiers H.S. Pour la Science
Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin
Cerveau & Psycho
Rédactrice en chef : Françoise Pétry
Rédacteur : Sébastien Bohler
L'Essentiel Cerveau & Psycho H.S.
Rédactrice : Bénédicte Salthun-Lassalle
Directrice artistique : Céline Lapert
Secrétariat de rédaction/Maquette : Annie Tacquenet, Sylvie Sobelman, Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy, Caroline Vanhoove.
Site Internet : Philippe Ribeau-Gésippe
Marketing : Élise Abib assistée de Anaïs Grelet
Direction financière : Anne Gusdorf
Direction du personnel : Marc Laumet
Fabrication : Jérôme Jalabert assisté de Marianne Sigogne
Presse et communication : Susan Mackie
Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé
Conseillers scientifiques : Philippe Boulanger et Hervé This
Ont également participé à ce numéro : François Arleo, Damir Buskulic, Nadine Cerf-Bensussan, Carlo Costantini, Françoise Dal'Bo-Milonet, Gérard Eberl, David d'Enterria, Évelyne Host-Platret, Jérôme Novak, Christophe Pichon, Estelle Rose-Koga, William Rostène, Daniel Tacquenet, Paul Tafforeau.
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

Intrications paradoxales

En 1935, Albert Einstein et d'autres physiciens travaillant sur la théorie quantique proposèrent que certaines particules, même fort éloignées, sont liées par une connexion qu'ils qualifièrent de fantomatique. En raison de ce phénomène nommé intrication, les propriétés de ces particules se coordonnent, c'est-à-dire que leurs états sont liés malgré la distance qui les sépare. Dans certains matériaux, les électrons sont intriqués en masse dans des conditions particulières de température et de pression. En considérant le « degré d'intrication » comme une dimension supplémentaire, les physiciens parviennent à étudier les surprenantes propriétés de ces matériaux *(voir Métaux étranges et théorie des cordes, page 36)*.

Des comportements étranges apparaissent dans un tout autre domaine : celui des statistiques, dont l'interprétation réserve parfois quelques surprises. Ainsi, supposons que l'on cherche à comparer l'effet d'un médicament et celui d'un placebo. Quand les hommes et les femmes sont testés séparément, le placebo est plus efficace. Mais quand on regroupe hommes et femmes, on constate que… le médicament est plus efficace que le placebo !

L'interprétation des statistiques réserve parfois quelques surprises.

Ce paradoxe dit de Simpson, du nom de celui qui l'a décrit le premier en 1951, est gênant. Il est indispensable d'en avoir conscience quand il s'agit de prendre des décisions sanitaires pertinentes *(voir L'embarrassant paradoxe de Simpson, page 80)*. Tout aussi embarrassant, le paradoxe d'Easterlin. Cet économiste américain confirma l'adage : l'argent ne fait pas le bonheur. Il l'établit en reliant la perception du bien-être en fonction des revenus. Toutefois, cette conclusion était sans doute hâtive et le paradoxe est remis en question : le bonheur serait relatif et dépendrait notablement de la fortune du voisin *(voir La mesure du bonheur, page 66)*.

Plus surprenant : les Français sont moins heureux que leurs voisins européens, à revenus comparables. Ils éprouvent moins d'émotions positives et davantage d'émotions négatives. La mentalité et la culture françaises en seraient la cause. À moins que quelque biais statistique n'entache ce résultat… ■

SOMMAIRE

1 ÉDITO

4 BLOC-NOTES
Didier Nordon

Actualités

6 Le plus ancien squelette de primate

7 Le sillage fait des vagues

8 Comment l'organisme cohabite avec sa flore intestinale

10 Un théorème pour nombres premiers presque jumeaux

.. et bien d'autres sujets.

Opinions

14 POINT DE VUE
Pour une mémoire des risques
Emmanuel Garnier

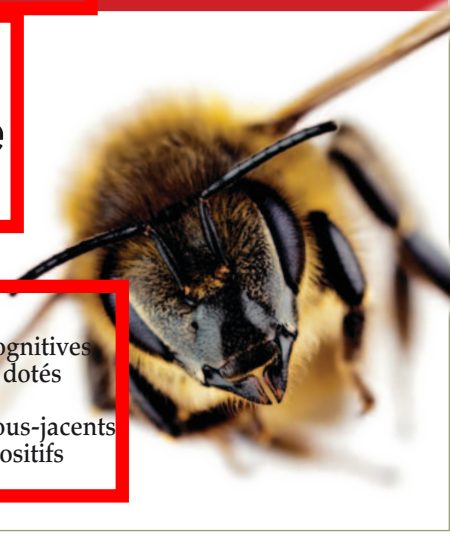
15 DÉVELOPPEMENT DURABLE
Marché européen du carbone : une réforme est nécessaire
Raphaël Trotignon

19 VRAI OU FAUX
Une planète doit-elle être petite pour être naine ?
Guillaume Jacquemont

Ce numéro comporte un encart « Voyage culturel de 8 jours en Turquie » (Dialogue Marketing) posé sur la totalité de la diffusion abonnés, et deux encarts d'abonnement *Pour la Science* brochés sur la totalité du tirage.
En couverture : © Peter Waters/shutterstock.com

À LA UNE

20 PSYCHOLOGIE ANIMALE
L'intelligence des abeilles
Aurore Avarguès-Weber
Les abeilles ont des facultés cognitives étonnantes pour des animaux dotés d'un si petit cerveau. L'étude des mécanismes neuronaux sous-jacents pourrait inspirer certains dispositifs d'intelligence artificielle.



28 BIOLOGIE MOLÉCULAIRE
Des clés moléculaires pour les cellules
Roland Brock et Wouter Verdurmen
La membrane des cellules est infranchissable pour nombre de molécules présentant un intérêt thérapeutique. De petits fragments de protéines découverts dans les années 1990 pourraient leur permettre d'accéder à l'intérieur des cellules

36 PHYSIQUE
Métaux étranges et théorie des cordes
Subir Sachdev
Certains états de la matière récemment identifiés ont pour origine des phénomènes quantiques que les théoriciens ont du mal à étudier avec les outils usuels. Un domaine inattendu vient à leur rescousse : la théorie des cordes.

44 MATHÉMATIQUES
Le tricot mathématique
Sarah-Marie Belcastro
Le tricotage permet de traduire des surfaces et des objets mathématiques abstraits en formes tangibles. Mais cela exige à la fois du temps et de la créativité.

52 TECHNOLOGIE SPATIALE
Des vols spatiaux pour tous ?
Alan Stern
L'espace de demain ne sera pas réservé uniquement aux touristes fortunés. Pour les chercheurs, l'industrie spatiale commerciale naissante ouvre des possibilités nouvelles, moins chères et variées.

59 ARCHÉOLOGIE
L'amphithéâtre romain, une architecture optimale
Jean-Claude Golvin
La *spectacula*, qui deviendra l'amphithéâtre, est le seul grand édifice antique spécifiquement romain. Il est le fruit de siècles d'une étonnante optimisation architecturale.

66 SCIENCES SOCIALES
La mesure du bonheur
Joachim Weimann, Ronnie Schöb et Andreas Knabe
Les économistes cherchent à quantifier la notion de bonheur. Mais les méthodes qu'ils élaborent sont à manier avec précaution et produisent des résultats aussi intéressants que difficiles à interpréter...

Regards

74 HISTOIRE DES SCIENCES
Les pionniers oubliés de la TSF
Jean-Jacques Ledos
Des débuts de la transmission sans fil, on connaît surtout les grandes étapes et les découvreurs associés. Mais son histoire est bien plus que cela.

80 LOGIQUE & CALCUL
L'embarrassant paradoxe de Simpson
Jean-Paul Delahaye
Les statistiques conduisent à des décisions fondées et rationnelles... à moins qu'un paradoxe ne s'en mêle, comme cela arrive avec certains jeux de données.

86 SCIENCE & FICTION
Le fantasme de l'invisibilité
Roland Lehoucq et J. Sébastien Steyer

88 ART & SCIENCE
Entre le vivant et l'inerte
Loïc Mangin

90 IDÉES DE PHYSIQUE
Les mélodies du café soluble et de l'hélium
Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

93 SCIENCE & GASTRONOMIE
Pelures toxiques
Hervé This

94 À LIRE

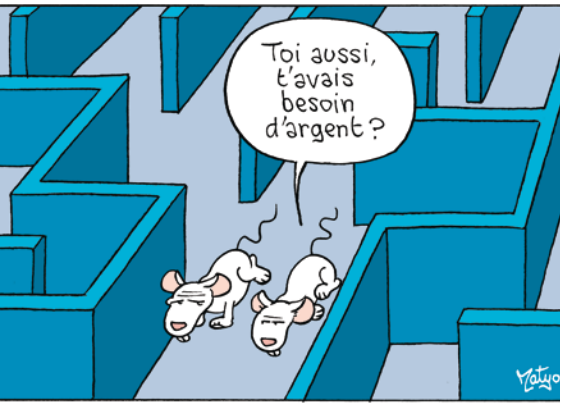
Rendez-vous sur
SCIENCE.fr
le site de référence
de l'actualité scientifique internationale
Toutes les sciences en un clic
Des actualités quotidiennes
Des articles en libre accès
Votre magazine numérique en ligne*
Plus de 8 ans d'archives*
Des services exclusifs
Les réactions aux articles**
Des offres d'emploi scientifiques
Des newsletters**
Un espace abonnement
* Service payant. Si vous êtes abonné(e), les numéros compris dans votre abonnement sont offerts.
** Sur certains titres seulement.

➔ COMMENT DÉBIAISER ?

Certaines recherches sur les comportements humains passent par l'observation de cobayes rémunérés. Ceux-ci, sans doute, sont moins souvent bourgeois nantis que chômeurs désargentés. Un biais risque donc de s'introduire. Qui sait si le stress dû à la pauvreté ne modifie pas, par exemple, la variation des paramètres physiologiques en fonction des stimulus ? Il s'est trouvé des chercheurs au XIX^{e} siècle pour envisager des hypothèses de ce genre, et étudier les particularités des odeurs émises par les mendiants (Alain Corbin, *Le miasme et la jonquille*, chap. *La puanteur du pauvre*).

L'argent n'est pas seul fauteur possible de biais. Une enquête de santé publique actuellement en cours suit une cohorte de volontaires sur une longue période : tests sanguins, examens médicaux, électrocardiogrammes, dépistages divers. Les gens que la médecine angoisse sont exclus ; si elle les effraie, s'ils ne se tournent vers elle que quand la maladie les y force, ils ne se sont sûrement pas portés volontaires. Qui sait si leur fuite devant la médecine n'est pas liée à des spécificités dans leurs profils médicaux qu'il aurait été intéressant de découvrir ?

Les biais sont aux statistiques ce que l'incomplétude est à la logique. On a beau faire, il se pose toujours des questions auxquelles on n'a pas de quoi répondre.



➔ AIMABLE CONTRADICTION

La meilleure façon d'enrichir votre pensée est d'écouter les objections et de les prendre non comme un désaveu mais comme une stimulation. Il n'y a donc rien de masochiste à dire : « J'aime la contradiction. » Mais, si vous dites cela et que, de fait, je contredis l'un de vos propos, je vais dans votre sens, puisque je flatte votre caractère. En apparence, je vous contredis ; en vérité, je me conforme à ce que vous attendiez de moi.

On ne peut jamais satisfaire ceux qui aiment la contradiction. Voilà pourquoi ils sont toujours contrariés.

➔ PRÉVISIONS INCERTAINES

La tirade de la calomnie du *Barbier de Séville* a beau décrire un procédé aussi familier à notre temps qu'à celui de Beaumarchais, elle ne dit pas si telle rumeur sur Internet visant telle personnalité est ou non une calomnie.

De même, lorsque La Rochefoucauld écrit : « Pour bien savoir les choses, il en faut savoir le détail ; et comme il est presque infini, nos connaissances sont toujours superficielles et imparfaites », il me console en montrant que de grands esprits ont été, eux aussi, désemparés devant le monde, mais il ne me donne aucun moyen de sortir de mes perplexités.

Enfin, les études sur les polémiques scientifiques décrivent la rigidité de savants passionnés au point de ne plus entendre les arguments adverses. Mais, quand une polémique éclate, les lois de la psychologie ne révèlent pas si la crispation de tel sur sa position tient au fait qu'il voit juste ou au fait qu'il s'accroche à son erreur.

Bref, les notations morales ou psychologiques cernent l'éternel humain, si tant est qu'il existe, mais n'aident pas à agir, car les circonstances auxquelles celui-ci est confronté sont toujours inattendues. Or tout dépend d'elles. Les problèmes jouent avec les hommes comme avec des dés. Quoiqu'un dé soit un objet bien connu, on ne sait jamais quelle face sortira. Un probabiliste ne prédit pas quelle combinaison gagnera au loto, pas plus qu'un météorologue ne prévoit si l'orage va éclater ici ou là-bas. Les sciences voient, elles aussi, l'issue des configurations éphémères leur échapper.

La relative constance des traits essentiels inhérents à l'homme nous donne du temps pour les découvrir au fil des siècles. Seulement, en chaque situation, les circonstances jouent un rôle déterminant. Et ce qu'elles ont de permanent, c'est de changer sans cesse. Du coup, connaître l'essentiel ne donne pas de maîtrise sur les événements.

➔ CASSANDRE CLAIRVOYANT

Celui qui, dans les années 1930, sentait venir une guerre était-il pessimiste ? Celui qui, dans les années 1960, estimait que la tension Est-Ouest se résorberait sans guerre était-il optimiste ? Non. Ils étaient clairvoyants.

Est-il pessimiste, celui qui, aujourd'hui, craint que la collecte de données informatiques et biométriques n'aide notre société à se muer en tyrannie ? Mauvaise question. Ce qui importe est de savoir s'il est clairvoyant.

Annoncer le pire afin qu'il ne se réalise pas : c'est le paradoxe du prophète de malheur. Sa noirceur n'est pas un excès, mais

un moyen. Il aura prévu un avenir terrible avec des arguments si forts que, grâce à lui, on aura détourné le cours des choses et évité cet avenir.

Donc, même si la suite des événements dément ses avertissements, il peut avoir été clairvoyant, c'est-à-dire avoir mis en garde contre un danger réel. Évidemment, il peut aussi s'être démené contre un danger imaginaire. Le recul du temps ne permet pas toujours de trancher. Il faudrait pouvoir faire de l'histoire contrefactuelle, et démontrer que, s'il ne l'avait pas prédite, la catastrophe se serait produite.

On peut parfois être sûr qu'un Cassandre avait raison, on ne peut jamais être sûr qu'il avait tort.

→ MÊME PAS MAL ?

Les résultats objectifs passent pour plus difficiles à obtenir et plus riches d'informations que les déclarations subjectives, toujours sujettes à caution. Il est cependant un domaine où l'inverse se produit : l'étude de la douleur chez les animaux. Les observations objectives ne manquent pas. Le jappement d'un chien après un coup ; les réactions de protection, comme le retrait d'une patte ; les modifications de pression artérielle, du rythme respiratoire ou cardiaque, etc. L'imagerie médicale explore aussi des pistes. Connaissant les zones du cerveau humain activées par la douleur, on peut supposer qu'un animal est en proie à ce que nous nommons douleur lorsque des zones analogues apparaissent activées chez lui.

Pourtant, cela ne nous éclaire pas sur son ressenti. Nous pouvons accumuler les observations, mais l'essentiel nous échappe : des informations subjectives sur ce que la douleur est pour un animal. ■

VIGIENATURE
Un réseau de citoyens qui fait avancer la science

Vigie-Nature, et si c'était vous ?

Dans un jardin, en ville, à la campagne et même au bord de la mer, faites partie d'un grand réseau citoyen et participez avec les chercheurs du Muséum national d'Histoire naturelle à mieux comprendre la biodiversité

CHAQUE OBSERVATEUR COMPTE

Vigie-Nature, fondé par le Muséum et co-piloté par des associations, offre aux citoyens la possibilité d'épauler les chercheurs en créant un réseau d'observateurs de la nature.

Le réseau : 10 000 participants réunis au sein de 16 observatoires de la biodiversité (papillons, oiseaux, chauves-souris, libellules, escargots, plantes sauvages en ville...) pour tous les curieux de nature, les naturalistes avertis, les élèves, les agriculteurs... Vigie-Nature c'est aussi 20 ans de données, 1 400 000 papillons comptés, 83 000 photos d'insectes pollinisateurs et 60 articles scientifiques publiés par plus de 25 chercheurs.

REJOIGNEZ LE RESEAU

Retrouvez tout l'été Vigie-Nature du lun. au ven. lors du 5/7 sur France Inter

Vigie-Nature soutenu par

VIGIENATURE.FR

MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE

Paléontologie

Le plus ancien squelette de primate

Un squelette fossile de primate vieux de 55 millions d'années a été découvert en Chine. Plus ancien que tous ceux connus auparavant, il nous renseigne sur les premiers primates

Une image tridimensionnelle du squelette d'*Archicebus achilles (a)* a été reconstituée grâce à une microtomographie par rayons X du fossile, réalisée au synchrotron européen de Grenoble. Il s'agissait d'un petit primate arboricole et insectivore *(c, vue d'artiste)*. Mis au jour en Chine centrale *(d)*, il appartient à la famille des tarsiidés, à l'instar des tarsiers actuels. Cette famille aurait divergé de celle des anthropoïdes (babouins, gorilles, humains, etc.) il y a plus de 55 millions d'années *(b, un arbre évolutif simplifié)*.

Qu'y a-t-il de commun entre le tarsier, un minuscule primate asiatique d'une vingtaine de centimètres, et l'homme ? Un ancêtre ! Une collaboration internationale menée par Xijun Ni, de l'Académie chinoise des sciences, a découvert un fossile vieux de 55 millions d'années, qui ressemblerait à cet ancêtre commun, voire aux premiers primates.

Le fossile a été mis au jour en Chine centrale, près du fleuve Yangzi Jiang. Il s'agit d'un squelette de primate quasi complet, le plus ancien connu : auparavant, seules quelques dents fossiles isolées datant de cette époque avaient été découvertes et les plus anciens squelettes étaient plus récents de sept millions d'années. Le nouveau fossile a été nommé *Archicebus achilles*, d'après le grec *archè* (signifiant « le premier ») et le latin *cebus* (« singe »). Le nom d'espèce, *achilles*, souligne la forme particulière de son talon, qui ressemble à ceux des anthropoïdes – la branche évolutive qui comprend notamment les grands singes et les humains.

Le fossile a d'abord été scanné aux rayons X au synchrotron européen ESRF (pour *European Synchrotron Radiation Facility*), à Grenoble. Les paléontologues ont ainsi reconstitué une image en trois dimensions du squelette. Ils ont alors pu l'analyser en détail et déterminer le mode de vie de l'animal, ainsi que sa place dans l'arbre évolutif.

Archicebus achilles vivait au début de l'Éocène, une époque chaude où une grande partie du monde était couverte de forêts tropicales. Il était minuscule, avec un corps d'environ sept centimètres et une queue de 13 centimètres. Il ne pesait qu'une vingtaine de grammes, un peu moins que le plus petit primate actuel, le microcèbe pygmée de Madagascar (un lémurien).

Certains éléments anatomiques, tels ses longues jambes et son gros orteil opposable, suggèrent qu'il se déplaçait en bondissant de branche en branche. La forme et la taille de ses dents indiquent un régime alimentaire constitué d'insectes. Il était actif le jour, comme le montre la taille de ses orbites – assez grandes, traduisant une bonne vision, favorable à la chasse, mais pas hypertrophiées comme celles des animaux nocturnes.

Pour déterminer sa place sur l'arbre évolutif des primates, les paléontologues ont répertorié et comparé plus de 1 000 caractères anatomiques, collectés sur 157 animaux. *Archicebus achilles* présente un mélange unique de caractères d'anthropoïdes et de tarsiers. Il appartiendrait à la même famille que ces derniers et serait né peu après la divergence avec les anthropoïdes.

X. Ni et son équipe pensent d'ailleurs qu'il ressemble à l'ancêtre commun des anthropoïdes et des tarsiers. Cet ancêtre serait donc de petite taille, et non pas grand comme les singes actuels, ainsi que le croyaient certains paléoanthropologues. *Archicebus achilles* pourrait même être assez proche des premiers primates, qui auraient donc été petits, arboricoles et insectivores.

Guillaume Jacquemont

X. Ni et al., Nature, en ligne le 5 juin 2013

Hydrologie

Sahara : les aquifères se rechargent, mais pas assez

À plusieurs centaines, voire milliers, de mètres sous le Sahara s'étend un gigantesque système aquifère, hérité de périodes humides anciennes. Grand comme presque deux fois la France métropolitaine, il contient plus de 30 000 kilomètres cubes d'eau. Il a permis le développement de communautés urbaines et agricoles, mais ces dernières n'épuisent-elles pas l'eau disponible ? Julio Gonçalvès, de l'Université d'Aix-Marseille, et ses collègues ont montré que le système se rechargeait, mais pas assez pour compenser les prélèvements.

Les oasis du Sahara puisent dans les eaux souterraines.

Les chercheurs ont analysé les variations locales de l'accélération de la pesanteur, mesurées depuis 2002 par le satellite germano-américain GRACE, et en ont déduit les variations de la masse d'eau souterraine. Ils ont aussi estimé les quantités d'eau qui s'échappent du système aquifère, principalement en raison du pompage pour l'irrigation. Ils ont ainsi montré que les eaux de pluie et de ruissellement lui apportent en moyenne 1,4 kilomètre cube d'eau par an, mais que cette recharge ne représente que 40 pour cent des pertes. Une gestion plus durable de l'eau doit donc être mise en place.

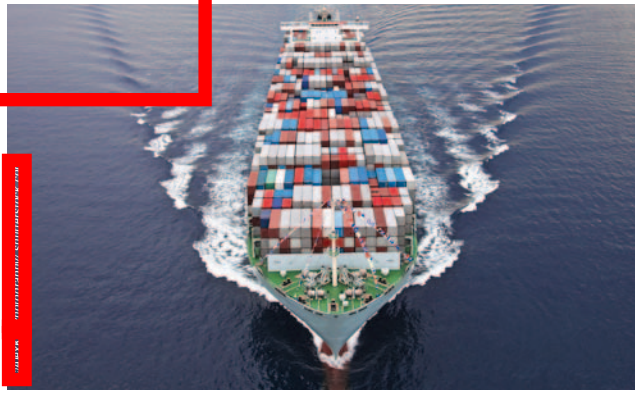
→ G. J.

J. Gonçalvès et al., Geophysical Res. Lett., en ligne le 17 avril 2013

Physique

Le sillage fait des vagues

En 1887, le physicien anglais William Thomson, qui se nommera plus tard lord Kelvin, s'intéressa au sillage des bateaux. Les ondes de gravité créées à la surface de l'eau par la coque qui avance s'écartent du bateau en formant un sillage en V, dont l'angle est d'environ 39 degrés. Kelvin montra que cet angle était constant. Mais l'observation de bateaux modernes et rapides révèle un sillage plus étroit. Marc Rabaud et Frédéric Moisy, du Laboratoire FAST à Orsay, ont expliqué pourquoi cet angle change quand la vitesse augmente.



Pour comprendre ce qui se passe à grande vitesse, il faut revenir sur le raisonnement de Kelvin sur les bateaux de l'époque, dont l'allure était modérée. Lorsque le bateau se déplace, il crée des ondes circulaires à la surface de l'eau. L'ensemble de ces ondes forme alors le sillage en V, qui s'écarte vers l'extérieur à une vitesse proportionnelle à celle du bateau. Par construction géométrique, on trouve que l'angle du V est constant et vaut 38,94 degrés. Il ne dépend ni de la longueur du bateau ni de sa vitesse.

Ce résultat ne semble toutefois pas vrai pour des bateaux rapides. M. Rabaud et F. Moisy ont montré que la formation du sillage change de régime quand le bateau dépasse une vitesse critique. Cette dernière est liée à la longueur du bateau, qui impose la longueur d'onde et donc la vitesse maximale des ondes que le navire peut créer. Dans ce régime, la vitesse des ondes les plus rapides plafonne à cette valeur critique. Cette limitation fait que le sillage ne peut plus s'étendre latéralement aussi vite que dans le régime de Kelvin à faible allure : il forme alors un cône plus étroit.

→ Sean Bailly

M. Rabaud et F. Moisy, Physical Review Letters, vol. 110, 214503, 2013

En bref

Les débuts du vin gaulois

La culture du vin a débuté durant le Néolithique au Proche-Orient. Elle s'est étendue au fur et à mesure vers l'Ouest, autour du bassin méditerranéen. Les fouilles de l'ancien port de Lattara, près de Montpellier, montrent une activité d'importation de vin étrusque vers l'an –500. Ces échanges ont permis le développement d'une production locale vers –400 : c'est ce que confirme l'analyse chimique de résidus sur une presse en calcaire trouvée sur le site, analyse effectuée par une équipe américano-française.

Volcans et hivers irlandais

L'émission volcanique d'aérosols de soufre dans l'atmosphère pourrait réduire la température globale de cette dernière, car les particules diffusent une partie de la lumière solaire. Pour tester cette hypothèse, une équipe internationale a utilisé des chroniques irlandaises qui couvrent la période de 431 à 1649 et qui évoquent 69 hivers rigoureux. Les chercheurs ont noté que 37 hivers rigoureux ont coïncidé avec des éruptions, lesquelles ont été datées par analyse de carottes de glace groenlandaises.

Les TOC neutralisés

Les troubles obsessionnels compulsifs (TOC) toucheraient près de un million de personnes en France. On sait qu'ils sont liés à un manque d'inhibition du striatum (une structure cérébrale impliquée notamment dans les habitudes) par le cortex. Sur des souris présentant des TOC, une équipe internationale a stimulé, par optogénétique (activation par un faisceau lumineux de neurones modifiés génétiquement), les neurones du cortex connectés au striatum : les TOC des animaux ont notablement diminué.

En bref

Marqueurs de virulence

Dans les tumeurs cancéreuses, les gènes exprimés d'ordinaire seulement dans d'autres tissus sont activés. Une équipe franco-américaine s'est servie de ce phénomène pour établir des biomarqueurs de la virulence. Pendant dix ans, les chercheurs ont étudié les gènes exprimés de façon anormale dans les cellules tumorales de près de 300 patients. Quelque 26 d'entre eux étaient associés à des cancers très agressifs. En déterminant quels gènes sont exprimés dans une tumeur, pourrait-on alors pronostiquer la virulence ?

Lèpre : peu de mutations

L'équipe de Verena Schuenemann, de l'Université de Tübingen, a séquencé le génome d'échantillons de *Mycobacterium leprae*, la bactérie responsable de la lèpre, provenant de cinq lépreux européens du XIe au XIVe siècles et de 11 patients actuels dans le monde. La bactérie a peu changé durant ce laps de temps : seules 300 mutations environ se sont produites. Cela suggère que le déclin de la lèpre au XVIe siècle n'est pas dû à une baisse de virulence du pathogène, mais à l'émergence d'autres maladies, ou à l'amélioration des conditions sociales.

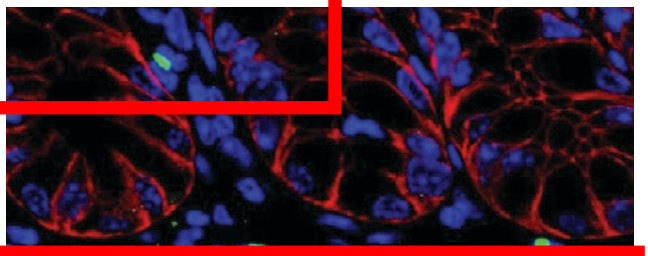
Immunologie

Comment l'organisme cohabite avec sa flore intestinale

L'intestin humain héberge pas moins de 10^{14} bactéries, qui participent à la digestion. Comment le système immunitaire rend-il possible cette cohabitation ? Gregory Sonnenberg, de l'Université de Pennsylvanie, aux États-Unis, et ses collègues ont apporté une réponse en mettant au jour un nouveau mécanisme de tolérance de la flore intestinale, l'ensemble des micro-organismes qui peuplent l'intestin. Chez la souris, ils ont montré qu'une sous-population de cellules immunitaires, des cellules lymphoïdes innées, limite la réaction inflammatoire de l'intestin.

Le système immunitaire intestinal agit en deux étapes. Une première réaction rapide est orchestrée par les cellules immunitaires dites innées. Certaines – les cellules lymphoïdes innées – renforcent la barrière intestinale, tandis que d'autres activent une seconde réaction plus lente et plus spécifique, dite adaptative. Dès la naissance, l'organisme renforce sa barrière intestinale, tandis que, au fil de l'alimentation, la flore intestinale évolue. Un équilibre s'instaure entre cette flore et le système immunitaire de l'intestin.

Pour comprendre comment il est maintenu, les biologistes ont étudié la réponse immunitaire de souris dont ils avaient supprimé une classe de cellules lymphoïdes innées impliquée dans la réaction aux microbes. Sans infection, les souris ont déclenché une forte réponse adaptative. Ces cellules contribueraient ainsi à l'homéostasie intestinale en limitant le recrutement des cellules de l'immunité adaptative.



Coupe histologique de l'intestin d'une souris observée en microscopie à épifluorescence. Les cellules lymphoïdes innées *(en vert)* sont rares à côté des cellules qui tapissent le tube digestif *(en rouge et bleu)*.

→ Marie-Neige Cordonnier

M. R. Hepworth et al., Nature, en ligne le 22 mai 2013

Astrophysique

La rotation étonnante d'une étoile à neutrons

Les pulsars sont des étoiles à neutrons qui tournent vite sur elles-mêmes et émettent un signal électromagnétique périodique. Leur vitesse de rotation diminue très lentement, mais peut croître de façon soudaine, ce que l'on nomme un « glitch ». Or des astronomes ont observé un glitch où la vitesse de rotation de l'étoile à neutrons a diminué au lieu d'augmenter.

La structure d'une étoile à neutrons est liée aux conditions extrêmes de pression et de densité qui y règnent (un centimètre cube d'un tel astre pèse un milliard de tonnes !). Dans le modèle le plus général, la croûte est constituée d'un réseau cristallin très compact de noyaux de fer. Plus en profondeur règne un superfluide (un fluide de viscosité nulle) riche en neutrons, qui pourrait expliquer les glitchs. En effet, l'étoile perd de l'énergie *via* ses émissions électromagnétiques et son vent stellaire. La rotation de la croûte ralentirait donc, tandis que le superfluide garderait sa vitesse initiale de rotation. La contrainte mécanique due à la différence de vitesses de rotation entre les deux couches serait brusquement libérée et produirait le glitch qui accélère la croûte.

À l'aide des données de l'Observatoire spatial *Swift*, Neil Gehrels, du Centre Goddard de vol spatial de la NASA, et ses collègues ont détecté un « anti-glitch » qui, au contraire, a ralenti l'étoile à neutrons 1E 2259+586, située à 10 000 années-lumière. La période de rotation, qui diminuait d'environ 12 microsecondes par an, a subi un ralentissement soudain de 2,2 microsecondes supplémentaires. Cette découverte oblige les astronomes à reconsidérer les modèles de la structure des étoiles à neutrons et à envisager des mouvements internes régis par le champ magnétique de l'étoile.

Vue d'artiste d'un « anti-glitch » accompagné d'une forte émission de rayonnement X.

→ S. B.

Nature, vol. 497, pp. 591-593, 2013

© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013

Entomologie

Des moustiques insensibles à l'odeur humaine

Certaines espèces de moustiques ont une préférence pour les humains et sont responsables d'épidémies de paludisme et de dengue. Matthew DeGennaro, de l'Université Rockefeller à New York, et ses collègues ont réussi à supprimer cette préférence chez le moustique *Aedes aegypti*.

Pour repérer leurs proies, les moustiques se fondent notamment sur leur odeur, qu'ils détectent grâce à de multiples récepteurs (des protéines membranaires des neurones olfactifs). Outre une partie caractéristique de la molécule cible, nombre de ces récepteurs portent une même chaîne d'acides aminés, nommée Orco.

Les moustiques *Aedes aegypti* préfèrent les humains aux animaux.

Les chercheurs ont modifié génétiquement des moustiques pour leur faire produire des chaînes Orco dysfonctionnelles. Les mutants ne détectaient plus l'odeur humaine et ne manifestaient plus de préférence envers les humains – que les moustiques repèrent pourtant par d'autres caractéristiques que l'odeur, telles que le dioxyde de carbone émis par la respiration.

→ G. J

M. DeGennaro et al., Nature, en ligne le 29 mai 2013

Neurobiologie

La molécule anti-grattage

La piqûre d'un insecte ou certaines maladies de peau, tel l'eczéma, provoquent des démangeaisons désagréables. On sait qu'une substance irritante active des récepteurs spécifiques de la démangeaison et situés à la surface des cellules de la peau. Ces récepteurs stimulent les fibres de certains neurones ganglionnaires de la racine dorsale de la moelle épinière. Mais quels sont ces neurones ? Santosh Mishra et Mark Hoon, de l'Institut américain de recherches dentaire et craniofaciale, à Bethesda, ont identifié des neurones ganglionnaires qui fabriquent le peptide natriurétique b, noté Nppb. Puis ils ont constaté que des souris génétiquement modifiées pour qu'elles ne produisent pas ce peptide ne réagissent plus aux substances provoquant des démangeaisons : elles ne se grattent plus ! En revanche, l'injection de Nppb dans leur moelle épinière entraîne des démangeaisons. Ce peptide stimule alors des interneurones de la moelle épinière, qui activent d'autres neurones transmettant la sensation de démangeaison au cerveau. La démangeaison met ainsi en œuvre des fibres sensorielles spécifiques libérant du Nppb. Si l'on trouve ce neuropeptide chez l'homme, saura-t-on bloquer son activité ?

→ Bénédicte Salthun-Lassalle

S. Mishra et M. Hoon, Science, vol. 340, pp. 968-971, 2013

Astrophysique

La relativité générale testée sur un système binaire

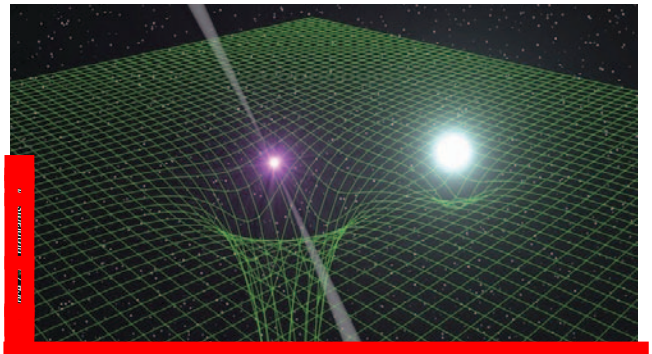
La théorie de la relativité générale, mise au point par Albert Einstein en 1915, n'a jamais été mise en défaut par l'expérience. Cependant, pour répondre à différentes questions, telle la nature de l'énergie sombre en cosmologie, les physiciens ont conçu des modèles qui sont des extensions de la théorie d'Einstein. Les différences entre ces modèles et la relativité générale sont trop infimes pour être mesurées en laboratoire. Mais un champ gravitationnel intense, comme il en existe dans le cosmos, peut accentuer les effets spécifiques de certains modèles. C'est le cas avec le système binaire PSR J0348+0432 qu'ont étudié John Antoniadis, de l'Institut Max-Planck de Bonn en Allemagne, et ses collègues.

Dans un système binaire, deux étoiles tournent l'une autour de l'autre. Elles se rapprochent peu à peu à cause de l'énergie perdue sous forme d'ondes gravitationnelles – des vibrations de l'espace-temps. La théorie de la relativité générale prévoit la forme de ces ondes et la perte d'énergie associée. Dans certaines extensions de cette théorie, l'énergie emportée par les ondes gravitationnelles diffère, ce qui se traduit par un rapprochement des étoiles et une variation de la période de révolution plus ou moins importants. Le système binaire étudié par l'équipe de J. Antoniadis est exceptionnel par sa composition. Il est constitué d'une naine blanche et d'un pulsar – une étoile à neutrons en rotation rapide sur elle-même. Les deux étoiles sont distantes de 830 000 kilomètres et tournent l'une autour de l'autre avec une période de révolution de 2,46 heures.

La première étape de l'étude a consisté à mesurer avec précision les caractéristiques des deux astres. Ainsi, le pulsar a une masse double de celle du Soleil et tourne sur lui-même en 39 millisecondes, tandis que la naine blanche pèse 0,172 masse solaire. Une trentaine de paramètres du système binaire ont ainsi été mesurés ou calculés. À partir de ces données, il est possible de déterminer la variation attendue sur la période de révolution du système binaire, dans le cadre de la relativité générale ou d'un autre modèle. La mesure effectuée par J. Antoniadis et ses collègues s'est révélée compatible avec la théorie de la relativité générale, et permet d'éliminer certaines extensions imaginées par les théoriciens.

→ S. B

Science, vol. 340, n° 6131, 2013



Le système binaire PSR J0348+0432 est formé d'un pulsar *(à gauche)* et d'une naine blanche *(à droite)* séparés de 830 000 kilomètres.

Mathématiques

Un théorème pour nombres premiers presque jumeaux

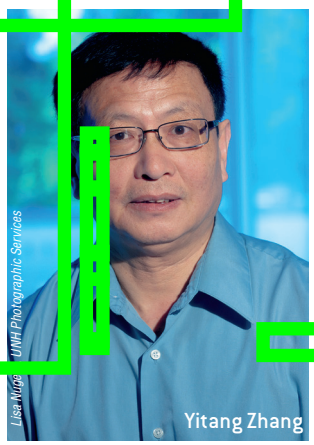
Yitang Zhang, de l'Université du New Hampshire, à Durham aux États-Unis, vient de produire un résultat mathématique qui pourrait ouvrir la voie à la démonstration de la conjecture des nombres premiers jumeaux.

Rappelons qu'un nombre premier est un entier qui n'est divisible que par 1 et par lui-même, et que deux nombres premiers sont dits jumeaux si leur différence est égale à 2 (le minimum). Les paires de nombres 3 et 5, 17 et 19 ou encore $2\,003\,663\,613 \times 2^{195\,000} - 1$ et $2\,003\,663\,613 \times 2^{195\,000} + 1$ en sont des exemples. D'après la conjecture des nombres premiers jumeaux, il existe une infinité de telles paires.

Comme la distance moyenne entre deux nombres premiers augmente, on peut se demander si cette conjecture est vraie. De nombreux mathématiciens ont tenté de la démontrer, sans succès jusqu'à Y. Zhang a adopté une nouvelle approche et a réussi à prouver qu'il existe une infinité de paires de nombres premiers dont la différence est inférieure à 70 000 000. Le mathématicien a choisi cette valeur parce qu'il avait besoin d'un nombre assez grand pour résoudre ses équations. Une différence de 70 000 000 étant très supérieure à 2, le résultat semble assez éloigné du cas des nombres premiers jumeaux. Il est pourtant très encourageant: il montre qu'il existe une infinité de paires de nombres premiers dont l'écart n'augmente pas quand on considère des nombres premiers de plus en plus grands. Reste à montrer qu'on peut réduire cet écart à 2!

→ S. B.

Annals of Mathematics, à paraître, 2013



Espèces
revue d'histoire naturelle
Vente en ligne, abonnements
compléments d'articles sur
www.especes.org

ESPÈCES
Revue d'histoire naturelle
Nº 8
Juin à août 2013
Zoologie Botanique Préhistoire Entomologie Ornithologie Ichtyologie Océanographie Systématique Herpétologie
Géophysique Climatologie Paléontologie Épistémologie Malacologie Primatologie
Génétique Arachnologie Éthologie Mammalogie Systématique
Zoologie Botanique

Dans l'eau, dans l'air, sous terre...
Diversité des mammifères

- Les Écrins : Colonies de murins sous surveillance
- Afrique : La beauté du rat-taupe nu
- Éthologie : La chevrette et ses petits
- France : Couleuvre à collier et couleuvre vipérine
- Nord : Les terrils du pays noir passent au vert
- Asie : Histoire d'un bovidé disparu : le kouprey

Climatologie Minéralogie Ornithologie
Zoologie Botanique Géologie Entomologie
Géophysique Climatologie

Espèces est une revue dédiée aux sciences de la vie et de la terre qui donne la parole aux acteurs de la recherche au travers d'articles de fond, de reportages et d'actualités.

Revue trimestrielle publiée
par l'association Kyrnos publications
7, le Vieux-Chêne - 20225 Avapessa

En vente en kiosque et par correspondance
sur www.especes.org
Numéro 7,5 €
Abonnement 1 an (4 numéros) 27 € (scolaires et étudiants 25 €)
Ventes et abonnements : Revue *Espèces*,
service client 12 350 Privezac, 05 65 81 54 86, contact@bopress.fr

© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013

Paléontologie

Une protocarapace de tortue

La tortue est le seul animal dont la carapace est le fruit non pas d'une ossification de la peau, mais de la fusion de côtes et de vertèbres. C'est ce qu'avait montré, en 2008, l'étude d'un reptile vieux de 220 millions d'années découvert en Chine. Pour la première fois, on avait trouvé un ancêtre de la tortue dont la carapace était partiellement développée, ce qui avait permis de comprendre les grandes lignes de son évolution. Un reptile d'Afrique du Sud antérieur de 40 millions d'années, *Eunotosaurus africanus*, étudié par Tyler Lyson, de l'Université Yale aux États-Unis, et ses collègues, permet de préciser le scénario. Comme les tortues, *E. africanus* a neuf côtes élargies et ne présente pas de muscles intercostaux. En revanche, son épine neurale n'est pas élargie, ce qui suggère que les vertèbres ont fusionné après la mise en place des côtes et la réorganisation des muscles respiratoires.

→ M.-N. C.

T. R. Lyson et al., Current Biology, en ligne le 30 mai 201

Tortue léopard (*Stigmochelus pardalis*) d'Afrique du Sud

Physique

Second son pour du lithium

Rudolf Grimm, de l'Université d'Innsbruck, et ses collègues ont observé pour la première fois dans un gaz d'atomes ultrafroids (du lithium 6) un «second son» jusqu'à présent, cette onde de chaleur se propageant d'une façon qui rappelle la progression d'une onde sonore n'avait pu être observée que dans l'hélium superfluide, état obtenu à très basse température. Sous certaines conditions, les nuages d'atomes refroidis à des températures proches du zéro absolu deviennent, comme l'hélium, superfluides: le gaz adopte un état quantique macroscopique qui lui fait perdre toute viscosité. Comme on sait bien manipuler de tels gaz quantiques à l'aide de faisceaux laser, ils constituent un excellent système pour étudier la superfluidité. La mise en évidence du second son dans un gaz d'atomes ultrafroids, longtemps recherchée, en est une illustration.

→ François Savatie

A. Sidorenkov et al., Nature, vol. 498, pp. 78-81, 201

Physique des particules

Des gouttelettes de quarks et de gluons

Des gouttes 100 000 fois plus petites qu'un atome d'hydrogène? C'est ce que l'équipe du détecteur CMS (*Compact Muon Solenoid*), au CERN, pense avoir mis en évidence. Il ne s'agit pas de gouttes formées de matière ordinaire, bien sûr, mais de quarks et de gluons, les constituants des protons et des neutrons dont sont composés les noyaux atomiques.

Au LHC (*Large Hadron Collider* ou Grand collisionneur de hadrons) du CERN, quand on accélère deux noyaux de plomb à des vitesses extrêmes et qu'on les fait se percuter de front, on obtient dans un volume restreint une «soupe» de quarks et de gluons. Ce plasma quarks-gluons, par interactions de ses constituants, atteint un équilibre thermique caractérisé par une certaine température et une certaine viscosité. Des modèles hydrodynamiques permettent alors de décrire le comportement collectif des particules de cette «goutte» de matière.

Les expérimentateurs du LHC ont cette fois procédé à des collisions entre protons et noyaux de plomb. Le proton étant 200 fois plus léger qu'un noyau de plomb, l'énergie libérée lors d'une collision est plus petite qu'entre deux noyaux de plomb. Le nombre de particules produites lors de ces collisions étant plus faible, les physiciens ne s'attendaient pas à observer des phénomènes de comportement collectif. Cela a pourtant été le cas.

Pour mettre en évidence de tels comportements, les physiciens analysent les particules émises lors des interactions des quarks et des gluons. Ils déterminent leurs trajectoires et recherchent des corrélations dans la distribution angulaire des directions d'émission, qui signalent qu'il y a eu un comportement collectif, donc la formation d'une goutte.

En étudiant ainsi plusieurs milliards de collisions proton-plomb, l'équipe de CMS a identifié des corrélations et la formation de plusieurs centaines de gouttes, dix fois plus petites que celles obtenues avec des collisions plomb-plomb. Mais le comportement hydrodynamique n'est pas la seule interprétation possible de ces corrélations, et les spécialistes devront attendre de nouvelles collisions proton-plomb au LHC pour se prononcer de façon plus affirmative.

→ S. B.

CMS Collaboration, http://arxiv.org/abs/arXiv:1305.0609

Le détecteur CMS lors de son assemblage

Géophysique

Le sort des plaques de la croûte terrestre

Après une subduction, les plaques de croûte continentale ou océanique pénètrent dans le manteau terrestre, où elles se mélangent plus ou moins bien à ce dernier. Combien de temps ces plaques subsistent-elles dans le manteau ? L'analyse de laves volcaniques, constituées de roches du manteau terrestre, aide à répondre à cette question. Rita Cabral, de l'Université de Boston, et ses collègues américains, suédois et français (du Laboratoire Magmas et volcans, à Clermont-Ferrand), ont étudié des laves du volcan Mangaia des îles Cook, dans le Pacifique. Cette équipe de géologues a mis en évidence l'existence d'une croûte océanique enfouie dans le manteau et qui serait âgée d'au moins 2,45 milliards d'années.

L'analyse repose sur l'étude de la composition des laves en isotopes du soufre (^{32}S, ^{33}S et ^{34}S). À l'aide d'une sonde ionique, au Muséum d'histoire naturelle de Stockholm, en Suède, les chercheurs ont mesuré les rapports des isotopes de soufre dans quelques inclusions magmatiques, des traces de roche fondue piégées dans des cristaux d'olivine que contiennent les laves de Mangaia.

Les géologues ont montré que le fractionnement isotopique du soufre de ces inclusions est « anormal », c'est-à-dire différent de celui de la roche environnante, et qu'il indique une ancienneté de plus de 2,45 milliards d'années. L'atmosphère terrestre était alors pauvre en oxygène et donc dépourvue de couche d'ozone (O_3). Le rayonnement ultraviolet pénétrait dans l'atmosphère et, par certaines réactions photochimiques, a produit le fractionnement isotopique anormal. Ainsi, une plaque océanique aurait acquis cette composition isotopique en soufre avant de plonger dans le manteau. Une plaque plus récente aurait eu une signature isotopique différente. R. Cabral et ses collègues ont ainsi démontré, pour la première fois à partir d'un échantillon de lave, que du matériau de la croûte terrestre était recyclé dans le manteau.

→ S. B

R. A. Cabral et al., Nature, vol. 496, pp. 490-494, 2013

Archéologie

Une bien vieille jambe de bois

Entouré de montagnes, le bassin du Tarim, entre Chine et Afghanistan, est une des régions les plus sèches du monde. Grâce à cette particularité assurant une bonne conservation des matériaux organiques, une tombe vient d'y livrer une prothèse de jambe en bois vieille de plus de 2300 ans – la plus ancienne connue.

Cette jambe de bois appartenait à un membre des communautés agropastorales qui occupaient les oasis du Tarim. Sa tombe a été récemment fouillée par l'équipe de Mayke Wagner, de l'Institut archéologique allemand, au milieu d'une nécropole située à 35 kilomètres à l'Est de Turan, ville du Turkestan chinois.

L'homme a été enterré à un mètre de profondeur avec un peu de vaisselle et deux arcs à double courbure, typique des guerriers nomades d'Asie centrale. L'homme, d'environ 1,75 mètre et de constitution robuste, a été frappé par la tuberculose. Il semble avoir résisté pendant des années à la maladie, qui a toutefois provoqué une ankylose osseuse du genou gauche, ce qui l'empêchait de marcher.

Des artisans lui ont façonné une prothèse de jambe de qualité comparable aux prothèses que l'on faisait en Europe par exemple pour aider les mutilés de la Grande Guerre ! Longue de 89 centimètres et composée de quatre parties en bois et en corne, dont une plaque de bois de 52 centimètres, elle se fixait à la cuisse par l'extérieur. Elle était percée de 16 trous, par lesquels passaient sans doute des lacets de cuir. L'usure des trous par les lacets indique que cette jambe de bois et de corne a été utilisée des années durant, jusqu'à faire en quelque sorte partie du corps de son propriétaire et à l'accompagner dans la tombe.

→ F. S.

Xiao Li et al., Quaternary International, vol. 290-291, pp. 335-343, 2013

Reconstitution de la jambe de bois (et de corne) mise au jour.

DERNIÈRE minute...

FONTE DE L'ANTARCTIQUE PAR LE DESSOUS

Les barrières de glace de l'Antarctique correspondent au prolongement des glaciers, qui s'étendent sur l'océan. Elles s'avancent continuellement, mais perdent en masse lors de leur progression. Le vêlage – le détachement de blocs de glace – était considéré comme le mécanisme principal. Éric Rignot, de l'Université de Californie à Irvine, et ses collègues ont montré que c'est le cas pour les barrières de glace les plus grandes. Mais sur l'ensemble de l'Antarctique, la fonte de la glace située en dessous, au contact de l'eau de mer, serait globalement plus efficace.

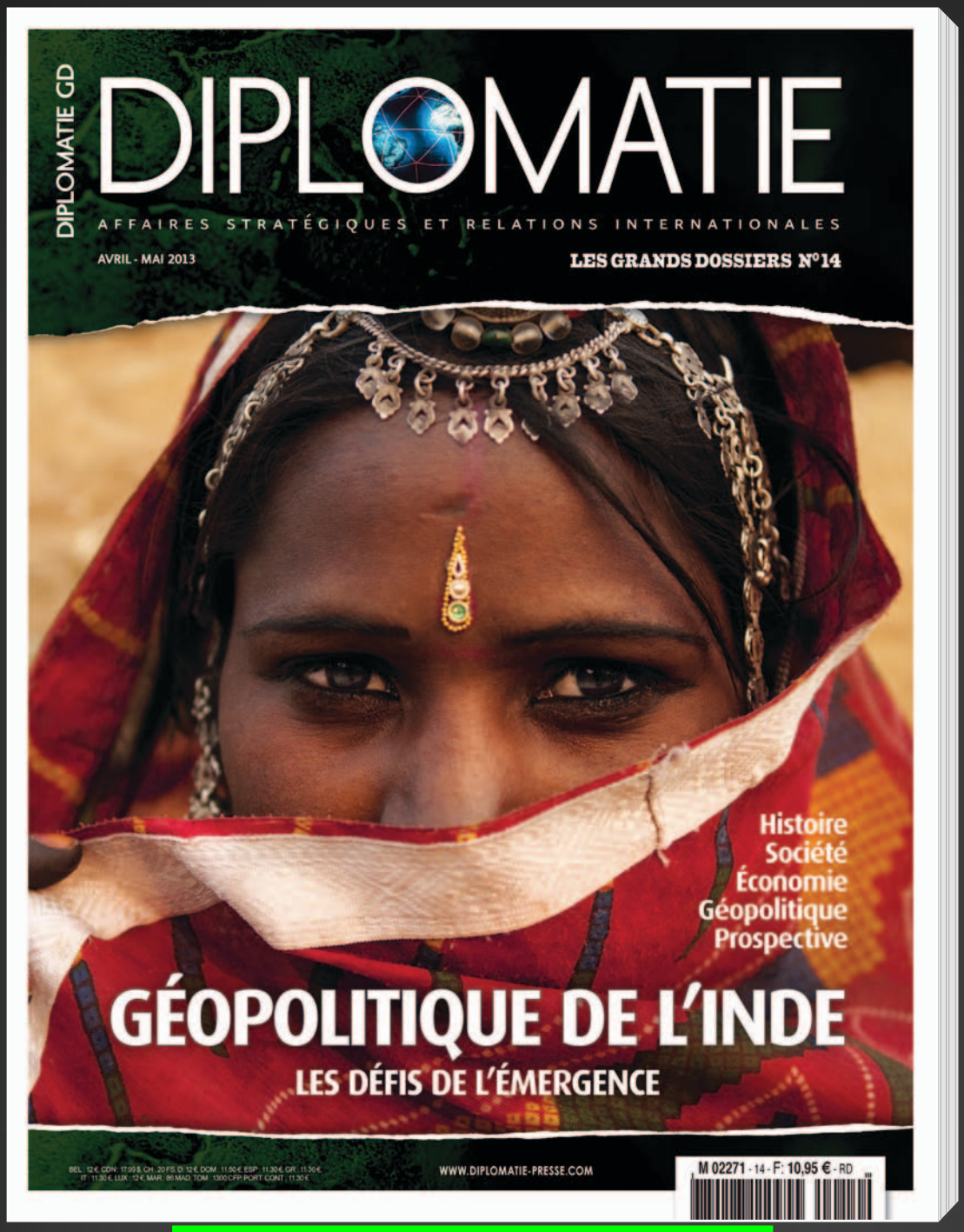
NANOTUBES ULTRASENSIBLES

Adrian Bachtold, de l'Institut de photonique de Barcelone, et ses collègues ont montré qu'en utilisant des nanotubes de carbone en guise de résonateurs mécaniques, on peut détecter des forces infimes, de l'ordre de la dizaine de zeptonewtons (1 zN = 10^{-21} newton) à une température de 1,2 kelvin, ce qui représente une sensibilité 50 fois supérieure aux records actuels. La technique, qui consiste à mesurer les vibrations du nanotube créées par une force extérieure, pourrait s'appliquer notamment à la détection et à la manipulation de spins (moments magnétiques) nucléaires.

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

© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013

En vente chez votre marchand de journaux



100 pages • Format 23x30 cm • 10.95 € (codification Presstalis : 02271

Commandez DIPLOMATIE sur Internet www.GEOSTRATEGIQUE.com

Et ne manquez pas en librairie

ATLAS GÉOPOLITIQUE MONDIAL 2013

270 cartes et graphiques pour décrypter toute l'actualité internationale

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

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

POINT DE VUE

Pour une mémoire des risques

Une meilleure gestion des risques liés aux événements extrêmes ne sera possible que si l'on prend en compte l'histoire passée de tels événements et la façon dont ils ont été gérés à l'époque.

Emmanuel GARNIER

« Un véritable raz de marée qui déferle sur les côtes atlantiques ! » C'est en ces termes apocalyptiques que le quotidien *Ouest-France* évoque la tempête qui submerge le littoral atlantique entre le Sud de la Bretagne et la frontière espagnole en mars 1937. Sur le site inhabité de la future commune de La Faute-sur-Mer, la digue est coupée en plusieurs endroits et des militaires interviennent pour épauler les habitants de l'Aiguillon. Pourtant, 70 ans plus tard, élus, ministres et médias n'auront de cesse d'affirmer que la tempête Xynthia du 26 février 2010 relevait « d'un phénomène jamais vu depuis des siècles ».

De telles affirmations sont assez systématiques au lendemain de tout désastre naturel, alors même que le rapport SREX du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) du 28 mars 2012 sur l'adaptation de la gestion des risques d'événements extrêmes au changement climatique déplore que la plupart des données « historiques » se rapportant à ces événements se limitent à une période récente. Malheureusement, ce dogme de « l'inédit » se révèle néfaste sur le long terme : bien que la proposition de loi adoptée au Sénat le 3 mai 2011 à la suite de Xynthia revendique une « préparation à la gestion de crise et à la culture du risque », ses modalités pratiques, parce qu'elles s'appuient sur le caractère inédit, et donc imprévisible, des événements extrêmes, occultent la vulnérabilité croissante de nos sociétés.

Dans cette perspective, cependant, les sciences sociales apportent une contribution originale. Depuis six ans, plusieurs enquêtes sont conduites par des historiens français dans le cadre de programmes transdisciplinaires nationaux et internationaux (Union européenne, Royaume-Uni), visant à étudier, d'une part, l'évolution de la fréquence des événements extrêmes au cours des 500 dernières années et, d'autre part, la gestion des risques au fil de l'histoire. Les résultats obtenus à propos des tempêtes, des submersions ou des sécheresses montrent que ces événements sont récurrents, mais de fréquence aléatoire, sans recrudescence particulière au XXIe siècle.

En Europe, le XVIIIe siècle fait figure de période à risques en raison de températures plutôt élevées, associées à des tempêtes et à des sécheresses récurrentes. Hormis le rude hiver 1709, les années 1705-1740 sont marquées par des étés très chauds à Paris, observés et mesurés à l'époque par des scientifiques de l'Académie des sciences. L'expérience historique donne donc tout son sens à la notion souvent négligée de variabilité, géographique ou historique. Ainsi, alors que les Français percevaient Xynthia comme inédite, les Britanniques, les Hollandais et les Allemands savaient que ce risque littoral demeurait, eux qui avaient affronté de telles catastrophes en 1953 et en 1962. *A contrario*, l'approche historique consacrée aux cyclones dans l'océan Indien depuis le XVIIe siècle souligne une recrudescence de ces aléas depuis les années 1960, sans que ceux-ci soient plus forts pour autant.

L'histoire de la gestion du risque est aussi riche d'enseignements. Contre toute attente, le risque n'était pas vu jadis comme une fatalité, mais plutôt comme une attente : le souvenir d'une catastrophe passée créait une conscience collective d'une menace maritime permanente. Par peur que l'événement ne se reproduise, les populations percevaient le danger et se tenaient prêtes à agir. Pour maintenir cet état d'attente, la communauté veillait à entretenir le souvenir de ces événements sous des formes diverses et originales, par exemple les ex-voto marins pour les tempêtes ou les repères de crues pour les submersions.

À Toulouse, au XVIIIe siècle, les habitants des quartiers exposés aux inondations savaient qu'ils devaient atteindre la rue des Couteliers pour se mettre à l'abri. À Paris, des repères sur l'échelle du pont de la Tournelle indiquaient le degré de gravité des crues de la Seine. Au cours de la grande inondation de 1784, en fonction du niveau constaté, le libraire Hardy surélevait ses meubles et s'installait au premier étage de sa maison située sur l'île de la Cité. Les enquêtes orales dans les Cyclades, en Grèce, ont mis en lumière un exemple d'adaptation agricole original à la sécheresse, puisque les habitants avaient sélectionné des légumes capables de pousser sans eau. Connues localement sous le nom de plantes « anhydro », leurs semences sont aujourd'hui en passe de disparaître, car moins productives que les cultures intensives sous serres, alors que la sécheresse augmente dans cette région.

LA GRANDE SUBMERSION ATLANTIQUE de 1937 n'avait provoqué aucun décès dans le secteur de La Faute-sur-Mer.

Plus proche de nous encore, la grande submersion atlantique de 1937 n'avait provoqué aucun décès dans le secteur de La Faute-sur-Mer. La ville n'existait pas encore, à peine s'y trouvaient quelques cabanes de pêcheurs. Quant à L'Aiguillon-sur-Mer, elle se développait derrière la protection naturelle des deux cordons dunaires. Depuis, 3 000 maisons ont été construites sur d'anciennes zones marécageuses situées sous le niveau de la mer. En occultant les risques encourus, les aménageurs ont rendu ces secteurs plus vulnérables aux aléas marins. La multiplication des intérêts économiques et politiques depuis la création de la commune, en 1953, combinée à une perte de mémoire locale, expliquent le lourd bilan humain de Xynthia (53 décès).

Les groupes, observatoires ou comités dédiés à la prévention des risques se sont multipliés depuis 2010, sous la pression des instances européennes notamment. Ils sont constitués majoritairement de représentants de l'État et d'ingénieurs. Leur composante scientifique est en général constituée de spécialistes tels que des climatologues, des météorologues ou des hydrologues. Dans ces conditions, les remèdes préconisés ne sont pas forcément adaptés aux attentes des populations. La modélisation livre des scénarios contradictoires et complexes sur le plan mathématique pour le citoyen, alors que les systèmes de défense (réservoirs, digues, barrages) onéreux envisagés depuis 2010 et leur entretien semblent hypothéqués par la crise économique. On voit donc mal comment l'objectif ministériel et sénatorial visant à promouvoir une « culture du risque » parmi nos concitoyens pourrait être atteint si l'histoire des risques et du climat est occultée, alors même qu'elle constitue un outil privilégié de prévention. L'apport des sciences sociales n'a de sens que si elles produisent des résultats « appliqués » et si les instances scientifiques soutiennent cette recherche transdisciplinaire. Aujourd'hui, ce n'est pas le cas en France. ■

Emmanuel GARNIER est membre senior de l'IUF, professeur invité à l'Université de Cambridge et enseignant-chercheur attaché au CRHQ-Université de Caen (CNRS UMR 6583).

Salon Innovatives SHS, 16-17 mai 2013, Paris

À écouter dans l'émission *La Marche des Sciences* sur *France Culture* le jeudi 4 juillet à 14h.

www.dossiersdelascience.fr

DEVELOPPEMENT DURABLE

Marché européen du carbone : une réforme est nécessaire

Le prix du carbone est aujourd'hui trop bas pour inciter les entreprises à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre. Comment y remédier ?

Raphaël TROTIGNON

Plusieurs échéances balisent la réduction des émissions européennes de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone, méthane...). En 2020, ces émissions devront être inférieures de 20 pour cent à leur niveau de 1990, selon le « paquet énergie-climat » adopté en 2008. Les objectifs de réduction pour 2030 sont en cours de discussion. D'ici 2050, le Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) préconise une réduction d'au moins 80 pour cent, valeur adoptée dans une feuille de route européenne (non contraignante).

Le système européen des quotas de dioxyde de carbone (CO_2) est un instrument majeur pour cette « décarbonation » progressive de l'économie. Il consiste à plafonner la quantité d'émissions autorisée (auparavant illimitée) en créant des quotas d'émission (des droits d'émettre une certaine quantité de gaz), dont une partie est distribuée gratuitement aux entreprises et le reste vendu aux enchères. Les entreprises qui dépassent la quantité gratuite reçue peuvent acheter des quotas supplémentaires, tandis que celles qui sont plus économes peuvent revendre les quotas qu'elles n'ont pas « consommés ». S'instaure ainsi un marché du carbone, avec un prix associé au droit d'émettre, supposé inciter les entreprises à réduire leurs émissions.

Or en avril dernier, le prix du carbone s'est établi à son plus bas niveau historique, autour de trois euros la tonne de CO_2. Ce prix devrait être d'environ 30 euros pour qu'une centrale au gaz soit aussi rentable qu'une centrale au charbon (aux prix actuels du gaz, du charbon et de l'électricité), moins chère mais plus polluante. Cet exemple montre que le prix actuel du carbone est trop faible pour inciter au passage à des technologies « bas-carbone ». Les investissements risquent alors d'être retardés, jusqu'à ce qu'un réajustement brutal et coûteux soit nécessaire.

La faiblesse du prix actuel a trois causes principales. La première est la crise

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

POUR LA SCIENCE

en partenariat avec
nature jobs

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 Nature Jobs 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

économique, qui entraîne une baisse d'activité industrielle perçue comme durable, d'où une moindre demande de quotas d'émission. Au début de la crise, en 2008, le prix du carbone a d'ailleurs été divisé par trois en quelques mois, passant de 35 à 10 euros par tonne.

La deuxième cause est une surabondance de crédits carbone attribués dans le cadre du système international du protocole de Kyoto : ces crédits sont des droits d'émettre, que les entreprises peuvent acheter en plus des quotas européens. Contrairement aux prévisions initiales, l'Europe est la seule à en acheter, d'où leur excès, qui tire le prix du carbone vers le bas.

Enfin, la troisième cause réside dans les interactions du système des quotas et des autres politiques sur l'énergie et le climat. En 2011, après l'annonce de discussions européennes sur un plan visant à améliorer l'efficacité énergétique, le prix du quota d'émission a ainsi chuté presque instantanément de 17 à 12 euros la tonne, le marché anticipant un moindre besoin d'émissions.

Il est plutôt souhaitable que la crise économique fasse baisser le prix du carbone, afin de favoriser la reprise. En revanche, les autres causes sont structurelles et dommageables.

Comment optimiser le système des quotas ? La Commission européenne a proposé plusieurs réformes et les a soumises à une consultation publique. Elle suggère, par exemple, de renforcer les objectifs de réduction d'ici 2020 ou d'étendre le dispositif à des domaines non concernés aujourd'hui, tels les transports. À la Chaire Économie du climat, nous avons évalué l'effet de ces mesures sur le prix du carbone grâce à un modèle simulant l'offre et la demande.

L'une des propositions était de geler une partie des quotas de CO_2 (on parle de *backloading*) et de reporter leur mise aux enchères. Cette proposition a déjà été soumise au Parlement européen, qui l'a refusée en avril, afin de ne pas pénaliser les entreprises dans cette période de crise économique.

Nos simulations montrent de toute façon qu'une telle mesure n'aurait eu qu'un effet à court terme : le prix du carbone serait remonté à environ 16 euros la tonne en 2015, mais il serait ensuite retombé plus bas qu'aujourd'hui (pour un plafond de quotas identique).

Les simulations montrent aussi que, parmi les réformes proposées, seules celles donnant de la visibilité à long terme sur le plafond de quotas conduisent à redresser durablement le marché. Ainsi, l'action la plus appropriée serait d'accélérer l'adoption d'un objectif ambitieux de réduction des émissions pour 2030.

Toutefois, aucune des mesures proposées ne permet de réguler les interactions avec les autres politiques sur l'énergie et le climat. Pour ce faire, nous proposons de créer une autorité indépendante du marché du carbone (AIMC), comme il en existe sur

LA GOUVERNANCE DU MARCHÉ doit être réformée pour réguler les interactions avec les autres politiques énergie-climat

les marchés monétaires (régulés par les banques centrales).

Dans ce cadre, le Conseil et le Parlement européens fixeraient toujours les objectifs de réduction des émissions et définiraient les différents instruments pour y parvenir (marché du carbone, politique d'efficacité énergétique…). L'autorité indépendante du marché du carbone recevrait un mandat pour gérer la mise sur le marché des quotas, dans la limite d'un plafond initialement fixé. Elle pourrait ajuster ce plafond en cas de modification des autres politiques publiques, afin d'éviter les conséquences nuisibles de la superposition des différents instruments. Et elle devrait régulièrement rendre des comptes aux autorités publiques.

Lors des rendez-vous annuels sur le climat, l'Union européenne promouvra plus facilement son système de quotas si elle parvient à corriger ses dysfonctionnements. Elle resterait ainsi en pointe sur le marché du carbone – supposé l'aider à devenir pionnière dans les technologies vertes – face à ses concurrents : la Californie, la Chine et la Corée sont en train de déployer des outils du même type dans leur économie. ■

Raphaël TROTIGNON est chercheur à la Chaire Économie du climat, à l'Université Paris-Dauphine.

© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013

PRESSES POLYTECHNIQUES ET UNIVERSITAIRES ROMANDES

Editeur scientifique de référence depuis 1980

PARUTIONS PRINTEMPS 2013

MARES ET ÉTANGS

Ecologie, conservation, gestion, valorisation

Beat Oertli, Pierre-André Frossard (hepia, Genève)

Une somme sans précédent dédiée aux mares et aux étangs, à leur composantes physiques, leur fonctionnement écologique, leur faune et leur flore. Une référence pour les praticiens les naturalistes, professionnels ou amateurs.

2013, 512 p., ISBN 978-2-88074-963-7

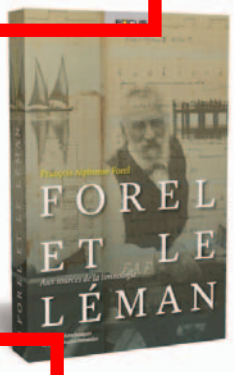
FOREL ET LE LEMAN

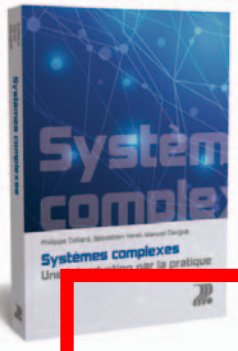
Aux sources de la limnologie

François A. Forel

L'autobiographie inédite de François Alphonse Forel, fondateur de la limnologie, augmentée des commentaires de nombreux spécialistes actuels. Une clé de compréhension inédite de l'écosystème et des phénomènes naturels du lac Léman.

2013, 320 p., ISBN 978-2-88074-969-9





SYSTÈMES COMPLEXES

Une introduction par la pratique

Philippe Collard, Sébastien Verel, Manuel Clergue (Université Nice Sophia Antipolis, Université des Antilles et de la Guyane)

Une introduction claire, synthétique et appliquée aux systèmes complexes, accessible à un large public.

2013, 320 p., ISBN 978-2-88074-991-0

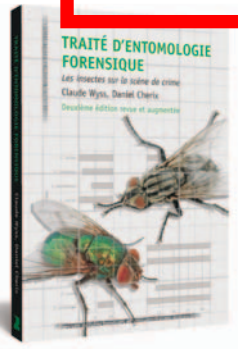
PREUVE PAR L'ADN

La génétique au service de la justice

Raphaël Coquoz, Jennifer Comte, Diana Hall, Tacha Hicks, Franco Taroni (Ecole des sciences criminelles, Lausanne)

Toutes les méthodes d'exploitation de la preuve par l'ADN, dans le cadre de l'analyse criminelle. Deux niveaux de lecture, une référence pour le spécialiste et le profane. Troisième édition entièrement mise à jour et augmentée.

2013, 472 p., ISBN 978-2-88915-006-9



TRAITÉ D'ENTOMOLOGIE FORENSIQUE

Les insectes sur la scène de crime

Claude Wyss, Daniel Cherix (Ecole des sciences criminelles, Lausanne)

Au travers d'enquêtes judiciaires et d'expériences pratiques, les auteurs fournissent les clés indispensables à l'élaboration de la datation de la mort (intervalle post-mortem) à l'aide des insectes nécrophages. Seconde édition revue et augmentée.

2013, 336 p., ISBN 978-2-88915-028-1

NOUVEAUTÉS

ET OUVRAGES DE RÉFÉRENCE

www.ppur.org
www.epflpress.com

Ouvrages disponibles en librairie

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

Offre liberté

19 € par trimestre

- ***Pour la Science*** (12 nos par an)
- ***Dossier Pour la Science*** (4 nos par an)

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

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

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

© Vidéo 2013 Showshank Films. Tous droits réservés.

BULLETIN D'ABONNEMENT

POUR LA SCIENCE

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

1 ❑ **Oui, je m'abonne à *Pour la Science* + *Dossier Pour la Science*** au prix de **19 €/trimestre** ou 76 € pour 1 an.
En cadeau, je reçois **le coffret de deux DVD *Énigmes des planètes*** (980809). Je bénéficie également des versions numériques de mes magazines sur **www.pourlascience.fr**

Votre cadeau de bienvenue !

2 **J'indique mes coordonnées**

Nom : Prénom

Adresse :

Code postal : Ville : Pays : Tél. : (pour le suivi client (facultatif))

Mon mail pour recevoir la newsletter *Pour la Science* (à remplir en majuscule) :

@

3 **Je choisis mon mode de règlement :**

❑ Je règle en douceur **19 €/trimestre.** Je remplis la grille d'autorisation de prélèvement ci-dessous en joignant impérativement 1 RIB (mode de paiement valable en France métropolitaine uniquement).

Autorisation de prélèvement automatique (France métropolitaine uniquement). J'autorise l'établissement teneur de mon compte à prélever le montant des avis de prélèvements trimestriels présentés par *Pour la Science*. Je vous demande de faire apparaître mes prélèvements sur mes relevés de compte habituels. Je m'adresserai directement à *Pour la Science* pour tout ce qui concerne le fonctionnement de mon abonnement.

Titulaire du compte à débiter

Nom, Prénom :

N° Rue

CP Ville

Établissement teneur du compte à débiter

Établissement :

N° Rue

CP Ville

Compte à débiter

Établissement Code guichet N° de compte Clé RIB

Date et signature obligatoire

Organisme créancier
Pour la Science
8 rue Férou – 75006 Paris
N° national d'émetteur : 426900

❑ Je préfère régler mon abonnement **en une seule fois 76 €** (+ frais de port en sus pour l'étranger : Europe 16 € - autres pays 35 €)

❑ par chèque à l'ordre de Pour la Science ❑ par carte bancaire N° :

Expire fin Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB)

Signature obligatoire

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

Offre réservée aux nouveaux abonnés. Vous bénéficiez d'un droit de rétractation de 14 jours à compter de la réception de votre premier numéro. Vous pouvez à tout moment résilier votre abonnement et vous serez remboursé des numéros non encore parus.

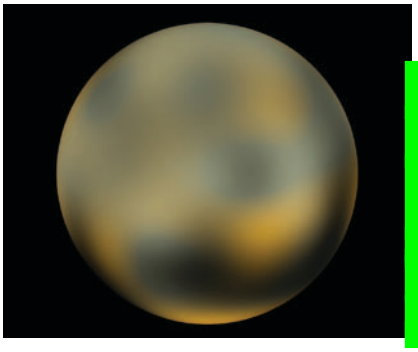
PLS429

VRAI OU FAUX

Une planète doit-elle être petite pour être naine ?

Non. Aucune taille maximale n'est spécifiée pour la catégorie des planètes naines.

Guillaume Jacquemont



Le 24 août 2006, le Système solaire perdait une planète. Pluton *(en médaillon)* était en effet dépossédée de son statut de planète et rétrogradée au rang de planète naine. Était-ce parce qu'elle est trop petite ?

La création d'un nouveau statut, celui de planète naine, a suscité de multiples débats en 2006. L'Union astronomique internationale a défini une planète comme un corps céleste en orbite autour du Soleil, ayant une masse suffisante pour que sa propre gravité lui donne une forme sphérique ou quasi sphérique, et qui a fait le vide sur son orbite ; la définition d'une planète naine est identique, à l'exception de ce dernier critère.

Or Pluton est loin d'avoir fait le vide : elle fait partie de la ceinture de Kuiper, un anneau de petits corps situé au-delà de l'orbite de Neptune. On soupçonnait l'existence de cette ceinture depuis les années 1940, mais elle n'a été détectée qu'en 1992. Elle comprendrait plus de un milliard de petits corps glacés. Quelque 1 500 ont déjà été découverts. Pluton n'a donc pas été déclassée parce qu'elle était trop petite, mais parce qu'elle n'était pas seule.

On connaît aujourd'hui cinq planètes naines (plusieurs dizaines d'autres candidats existent dans la ceinture de Kuiper, mais on n'a pas encore pu vérifier leur forme sphérique en raison de leur éloignement). La plus petite, Cérès, a un diamètre de 950 kilomètres. Découverte dès 1801, elle se situe dans la ceinture d'astéroïdes, un autre anneau de petits corps, qui s'étend entre Mars et Jupiter. Les autres planètes naines sont dans la ceinture de Kuiper. La plus grosse, Eris, a un diamètre d'environ 2 400 kilomètres (voisin de celui de Pluton). En comparaison, la Terre a un diamètre de 12 700 kilomètres et Mercure, la plus petite planète du Système solaire, de 4 880 kilomètres.

La plus grosse planète naine connue est donc deux fois plus petite que la plus petite planète. En outre, la ceinture d'astéroïdes et la ceinture de Kuiper « classique », située entre 30 et 50 unités astronomiques du Soleil (une unité astronomique est égale à la distance Terre-Soleil), ont d'assez faibles masses totales : quatre pour cent de la masse de la Lune pour la première et dix pour cent de la masse terrestre (un peu moins de deux fois la masse de Mercure) pour la seconde. Elles n'abritent donc aucun mastodonte.

Des planètes naines plus grosses que des planètes

Les planètes naines portent-elles alors bien leur nom et sont-elles condamnées à de petites tailles ? Non, selon Alain Doressoundiram, de l'Observatoire de Paris. La définition des planètes naines ne comprend aucune mention d'une taille maximale. Pour l'astrophysicien, plus un corps est gros, plus il a de chance d'avoir fait le vide autour de lui, mais cela n'impose pas une masse maximale claire, à partir de laquelle un corps nettoie-rait son orbite et deviendrait une planète.

En outre, des mécanismes externes pourraient expliquer en partie la petite taille des planètes naines connues. Ainsi, dans la ceinture d'astéroïdes, l'influence gravitationnelle de Jupiter perturberait les petits corps, qui entreraient en collision trop vite pour s'agglomérer et former des corps dépassant les tailles actuelles.

Selon A. Doressoundiram, on peut alors imaginer une planète naine plus grosse qu'une planète. Des estimations fondées sur la densité de matière en fonction de la distance orbitale montrent que des planètes naines de la taille de Mars pourraient exister dans la ceinture de Kuiper dite étendue ou détachée. Située au-delà de 50 unités astronomiques du Soleil, cette ceinture comprendrait bien plus de corps que la ceinture classique. Selon le modèle dit de Nice, son existence serait due à une incursion passée de Neptune dans la ceinture de Kuiper primitive, dont 99 pour cent de la masse auraient été éjectés vers la ceinture étendue.

La difficulté est que l'extrême éloignement de cette ceinture la rend difficile à observer. Par exemple, Sedna (un petit corps qui s'y trouve et qui fait environ les trois quarts de la taille de Pluton) est en orbite entre 76 et 900 unités astronomiques du Soleil.

La faible taille des planètes naines connues est donc due à la limitation de nos capacités de détection et à l'histoire particulière du Système solaire. Des planètes naines plus grosses que Mercure pourraient graviter à ses confins. Et rien n'interdit l'existence d'équivalents encore plus gros dans d'autres systèmes planétaires, où l'on a déjà détecté des ceintures de petits corps... ■

Guillaume JACQUEMONT est journaliste à Pour la Science.

© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013

L'intelligence des abeilles

Aurore Avarguès-Weber

Les abeilles ont des facultés cognitives étonnantes pour des animaux dotés d'un si petit cerveau. L'étude des mécanismes neuronaux sous-jacents pourrait inspirer certains dispositifs d'intelligence artificielle.

À l'évocation de l'abeille, on pense souvent à une organisation sociale élaborée. Une ruche comporte des dizaines de milliers d'ouvrières, toutes filles d'une seule reine, et qui assurent ensemble la survie de la colonie. Cependant, cet insecte se distingue aussi par des comportements individuels divers et complexes.

Une ouvrière vit de quatre à six semaines, sauf quand elle naît à la fin de l'été, car elle passe alors l'hiver en hibernation. Lors de sa courte vie, elle effectue des dizaines de tâches différentes, telles que le nettoyage de la ruche, le soin aux larves ou la collecte de nourriture. Au sein de la ruche, la plupart des tâches sont stéréotypées et déclenchées automatiquement par les stimulus (visuels, olfactifs...). En revanche, quand elle va butiner, l'abeille doit choisir des fleurs et naviguer dans un environnement complexe et changeant, conditions qui excluent les comportements stéréotypés.

Elle peut alors se repérer dans un rayon de plus de dix kilomètres de la ruche et mémoriser les caractéristiques des sources de nourriture visitées : emplacement, disponibilité temporelle (certaines fleurs produisent plus ou moins de nectar selon l'heure), qualité (concentration en sucre)… Les recherches récentes ont révélé les capacités cognitives mises en jeu lors de la collecte de nourriture. Elles sont d'autant plus étonnantes que l'abeille a un cerveau minuscule : 960 000 neurones qui tiennent dans moins de un millimètre cube, contre 100 milliards pour l'être humain.

Depuis un siècle, l'abeille a été utilisée dans des centaines d'études sur la perception, l'apprentissage et la mémoire. L'éthologue autrichien Karl von Frisch (1886-1982) en a été le pionnier. Ses recherches, débutées en 1910, ont été couronnées par le prix Nobel de physiologie en 1973. Il a notamment défini une méthodologie, toujours utilisée aujourd'hui, pour étudier la perception et la mémoire des abeilles. Celles-ci ont un comportement dit de constance florale : lorsqu'elles rencontrent des fleurs contenant du nectar, elles en mémorisent les caractéristiques et ne visitent par la suite que les

L'ESSENTIEL

- Le traitement cognitif de l'environnement visuel des abeilles est élaboré.
- Ces insectes classent les objets par catégories et utilisent des concepts relationnels, c'est-à-dire des relations abstraites liant les objets : nombre, configuration spatiale...
- Le substrat cérébral des concepts pourrait se trouver dans une zone nommée corps pédonculés. On cherche à le confirmer par des études d'imagerie ou en mesurant l'activité des neurones avec des électrodes.

© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013

1. POUR TESTER LES CAPACITÉS COGNITIVES DES ABEILLES, on les fait pénétrer dans un labyrinthe en Y. Dans l'une des branches se trouve un répulsif et, dans l'autre, une récompense (une solution sucrée) associée à ce qu'on cherche à apprendre à l'insecte (ici à reconnaître une image symétrique). Après la phase d'apprentissage, l'abeille doit choisir entre de nouvelles images ayant ou non la propriété testée. Ici, elle choisira celles dotées d'une symétrie *(à droite)*, ce qui montre qu'elle a identifié et mémorisé cette propriété.

leurs de la même espèce. Elles abandonnent l'espèce seulement quand elles visitent plusieurs fleurs « vides ». Ce comportement permet d'entraîner les abeilles à récolter une solution sucrée associée à une image, qu'elles mémorisent et vers laquelle elles reviennent lors de leurs voyages successifs – et ce des heures durant, afin de ramener le maximum d'eau sucrée à la ruche. En proposant ensuite aux abeilles un choix entre plusieurs images, on détermine les éléments spécifiques perçus et mémorisés.

Par exemple, on teste si l'abeille distingue les couleurs en associant un rond jaune à la solution sucrée pendant l'entraînement, et en lui présentant ensuite des ronds de couleurs variées : si elle se dirige plus souvent vers les ronds jaunes, c'est qu'elle est capable de distinguer les couleurs. De même, on teste si elle apprend préférentiellement les formes ou les couleurs en l'entraînant avec un carré bleu associé à la récompense et en lui faisant ensuite choisir entre un carré gris et un triangle bleu : si elle choisit le carré, c'est qu'elle a mémorisé la forme ; si elle choisit le triangle, c'est qu'elle se souvient de la couleur.

Grâce à cette méthodologie, von Frisch a montré en 1914 que l'abeille perçoit le monde en couleurs, mais que son spectre visuel est décalé vers l'ultraviolet par rapport au nôtre. À l'époque, ces résultats ont suscité la polémique. On sait aujourd'hui qu'ils s'expliquent par une coévolution des fleurs et de leurs pollinisateurs. De nombreuses fleurs présentent ainsi des sortes de pistes d'atterrissage dans l'ultraviolet, c'est-à-dire des motifs visibles uniquement à ces longueurs d'onde et qui guident les pollinisateurs vers le nectar.

Les abeilles distinguent aussi les formes. Elles reconnaissent des images complexes, malgré une faible acuité visuelle (elles perçoivent des images très pixellisées, avec une résolution 100 fois inférieure à la nôtre) : elles savent, par exemple, distinguer un paysage forestier d'un champ. Stockent-elles les images et les comparent-elles aux nouvelles pixel par pixel ? Une telle technique, dite de matching (littéralement, de correspondance), serait simple, mais coûteuse en termes de mémoire. Les recherches récentes indiquent plutôt que l'abeille réalise un traitement cognitif élaboré de son environnement visuel.

En quoi consiste un tel traitement ? L'homme, par exemple, effectue une catégorisation, c'est-à-dire qu'il classe instantanément les objets de son environnement en catégories : ainsi, il regroupe dans la catégorie « voiture » tous les objets présentant quatre roues, un moteur et une carrosserie. Pour définir une catégorie, le cerveau doit identifier des similarités, tout en faisant abstraction des autres propriétés. Cette classification diminue la quantité d'informations à mémoriser, puisque seuls les critères pertinents sont enregistrés. En outre, elle renseigne sur le comportement à adopter envers une entité (objet, animal...) avec laquelle on n'a jamais interagi, grâce aux interactions mémorisées avec d'autres entités de la même catégorie.

Classer les objets par catégories

En raison de la complexité du traitement des images, on a longtemps considéré la capacité de catégorisation comme l'apanage des vertébrés. Elle a notamment été mise en évidence chez les primates, les dauphins et les pigeons.

Cependant, on s'est aperçu dans les années 1990 que les abeilles sont aussi capables de catégorisation. L'une des catégories qu'elles distinguent est celle des objets présentant une symétrie interne, comme l'ont montré en 1996 Martin Giurfa, de l'Université de Toulouse, et ses collègues. Ainsi, quand on associe une récompense sucrée à différents dessins présentant un axe de symétrie, les abeilles apprennent que le critère récompensé est la symétrie. Par la

L'AUTEUR

Aurore AVARGUÈS-WEBER a travaillé au Centre de recherches sur la cognition animale, à l'Université de Toulouse, puis à l'Université Queen Mary, à Londres.

BIBLIOGRAPHIE

A. Avarguès-Weber *et al.*, **Simultaneous mastering of two abstract concepts with a miniature brain,** *PNAS*, vol. 109, pp. 7481-7486, 2012.

A. Avarguès-Weber *et al.*, **Visual cognition in social insects,** *Annual Reviews of Entomology*, vol. 56, pp. 423-443, 2011.

L. Chittka et K. Jensen, **Animal cognition : concepts from apes to bees,** *Current Biology*, vol. 21, pp. 116-119.

M. Srinivasan, **Honey bees as a model for vision, perception, and cognition,** *Annual Reviews of Entomology*, vol. 55, pp. 267-284, 2010.

© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013

suite, elles choisissent préférentiellement les dessins dotés de cette propriété, même quand elles ne les ont jamais vus *(voir la figure 1)*. Une telle capacité pourrait leur être très utile dans la nature, car les fleurs, notamment, présentent une symétrie interne.

Leur faculté de classer leur environnement en catégories a été confirmée par de nombreuses études. Les catégories identifiées sont variées : paysages, plantes, fleurs, images orientées d'une même façon composées, par exemple, de rayures)…

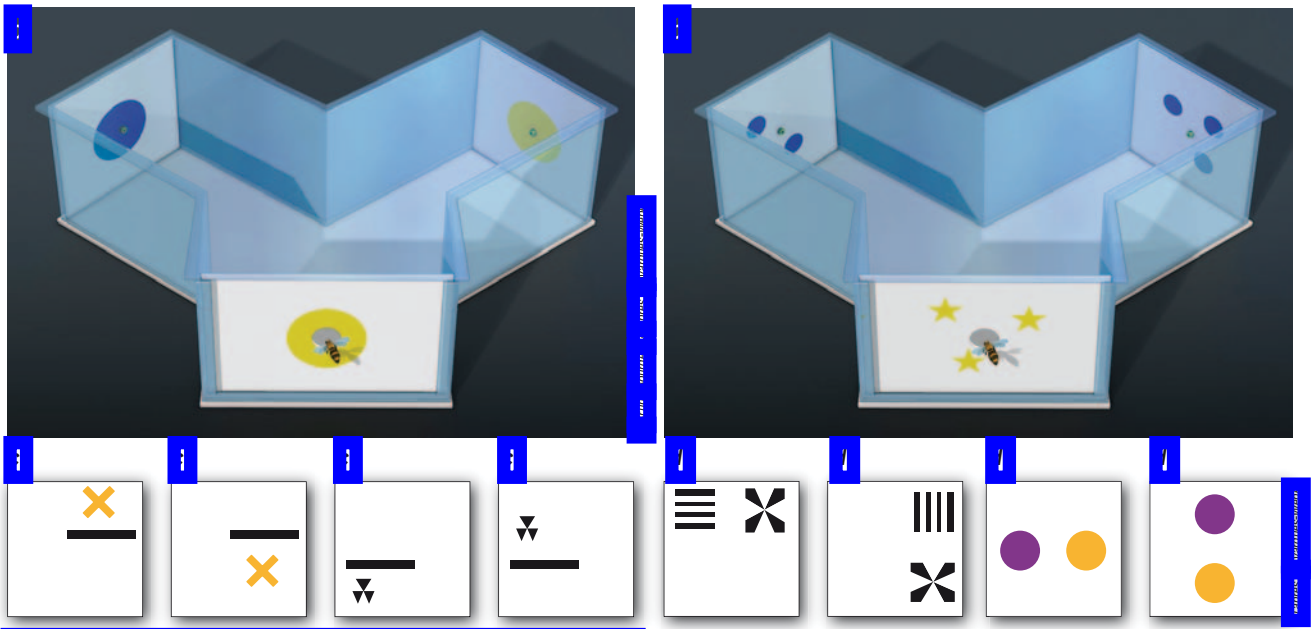
Les catégories du type paysage ou plante, dites perceptives, sont fondées sur des similarités visuelles. Elles ne nécessitent pas un traitement cognitif très élaboré. De même, la détection de la symétrie et de l'orientation est assez simple : elle se fonde probablement sur l'activation de quelques neurones spécialisés, comme c'est le cas chez les vertébrés. Pour l'orientation, des neurones analogues à ceux assurant cette tâche chez les vertébrés ont d'ailleurs été identifiés.

Il existe deux autres types de catégories, qui nécessitent des capacités cognitives supérieures, en raison d'un degré supplémentaire d'abstraction : les catégories fonctionnelles et les catégories conceptuelles. Les premières dépendent de la fonction de l'objet (nourriture, meuble…), indépendamment de son apparence ; on ignore si les abeilles sont capables d'une telle catégorisation. Les secondes regroupent des objets ou des événements liés par une relation particulière, telle que « avant », « au-dessus », « plus grand que », « identique », « en même nombre que », etc. (en sciences cognitives, un concept est défini par une telle relation). Une catégorie conceptuelle est, par exemple, l'ensemble des groupes de deux objets.

Les concepts relationnels servent à nous représenter des scènes ou des événements, mais sont difficiles à appréhender. Une girafe et la Tour Eiffel seront ainsi regroupées dans la même catégorie, celle des entités « grandes » (par comparaison implicite aux autres animaux et aux autres monuments), alors qu'elles n'ont en commun aucune caractéristique physique ou fonctionnelle, pas même leur taille absolue. Les concepts relationnels ne peuvent se former qu'à partir de multiples exemples concrets, avec des objets donnés. Leur comparaison permet au cerveau de dégager une relation commune, au-delà des différences entre les images. Cette relation devient alors abstraite, c'est-à-dire indépendante des objets qu'elle lie.

Le système visuel des abeilles

Les abeilles ont des yeux à facettes (5 500 par œil), chacune représentant un pixel. Elles perçoivent alors des images très pixellisées, avec une résolution 100 fois inférieure à la nôtre. En revanche, elles sont plus sensibles aux mouvements, grâce à l'activation successive des différentes facettes par un objet en déplacement. En outre, elles ont un champ visuel de 320 degrés, bien plus large que le nôtre.



2. LES CONCEPTS RELATIONNELS sont des relations liant les objets, telles que « identique à », « en même nombre que » et « au-dessus de ». Les abeilles sont capables de maîtriser ces trois derniers concepts. Dans un labyrinthe en Y, elles peuvent apprendre à choisir la branche terminée par une image de couleur identique à celle présentée à l'entrée *(a)* ou comportant le même nombre d'éléments *(b)*. Elles transfèrent même la règle d'identité à des formes et à des odeurs : après l'avoir apprise avec des couleurs, elles choisissent spontanément la branche contenant une odeur ou une forme identique à celle présentée à l'entrée. De même, elles peuvent apprendre à choisir la branche contenant une certaine configuration spatiale : celle où un objet est au-dessus d'une barre de référence (c_1 et c_4) contre celle où il est au-dessous (c_2 et c_3), ou celle où deux objets sont l'un au-dessus de l'autre (d_2 et d_4) contre celle où ils sont côte à côte (d_1 et d_3). Dans tous les cas, les images récompensées ne se ressemblent pas (les trois étoiles sont, par exemple, très différentes des trois ronds bleus) : elles n'ont en commun que la relation à apprendre, tel le nombre d'éléments. Pour les abeilles, cette relation devient donc abstraite, c'est-à-dire indépendante des objets.

Chez l'homme, l'abstraction – et donc l'acquisition des concepts relationnels – est facilitée par le langage. Quand ils l'enseignent aux enfants, les adultes favorisent les comparaisons entre des entités différentes, liées par une relation identique, en leur appliquant le même mot. C'est le cas, par exemple, lorsqu'ils disent : « Tu as deux bras, deux jambes, deux oreilles. » En revanche, les très jeunes enfants, les primates et les dauphins ont besoin d'un long entraînement pour maîtriser des concepts relationnels. On ne s'attendait donc pas à ce que les abeilles, avec leur cerveau miniature et l'absence d'un langage élaboré, réalisent de telles prouesses cognitives.

Pourtant, depuis le début des années 2000, on a montré qu'elles sont capables de maîtriser plusieurs concepts relationnels *(voir la figure 2)*. Devant l'étonnement des scientifiques, un grand nombre d'expériences et de vérifications ont été effectuées, bien plus que lors d'études similaires sur les primates.

Les abeilles savent compter jusqu'à 4

En 2001, M. Giurfa et ses collègues ont ainsi appris à des abeilles à reconnaître le concept relationnel d'identité. Pour ce faire, ils les ont introduites dans un labyrinthe en Y où une même couleur était indiquée à l'entrée et dans une des branches (contenant une récompense sucrée). Après une phase d'entraînement, non seulement les abeilles se dirigeaient vers la branche repérée par la couleur présente à l'entrée, mais elles étaient capables de transférer cette règle d'identité à des formes et, de façon surprenante, à des odeurs ! En effet, quand une forme géométrique ou une odeur était présentée à la fois à l'entrée du labyrinthe et dans une des branches, les abeilles se dirigeaient vers cette branche. Aucun entraînement supplémentaire n'était nécessaire.

Grâce à un dispositif expérimental similaire, les abeilles peuvent apprendre à choisir l'image comportant le même nombre d'éléments que celle présentée à l'entrée du labyrinthe, et ce, même quand ces éléments ne se ressemblent pas et sont disposés différemment. C'est ce qu'ont montré en 2009 Hans Gross, de l'Université de Würzburg, en Allemagne, et ses collègues. Les abeilles sont donc capables de compter ! Mais seulement jusqu'à quatre : à partir de cinq objets, elles ne réussissent plus l'expérience.

Une étude menée en 1996 par Lars Chittka, de l'Université Queen Mary, à Londres, et Karl Geiger, de l'Université de Berlin, suggérait déjà une telle capacité : les deux chercheurs avaient appris aux abeilles à retrouver une source de nourriture située après un nombre donné de repères visuels (de petites pyramides bleues). Cependant, elles auraient pu se fonder sur une perception globale et non sur un comptage des pyramides une par une. En outre, les repères visuels étaient toujours identiques, tandis que dans l'étude de H. Gross, les abeilles choisissaient en fonction du nombre d'objets, même si elles n'avaient jamais vu ces objets. Cet aspect est essentiel pour parler d'abstraction et de concept relationnel.

Dans l'équipe de M. Giurfa, au sein de laquelle j'ai travaillé de 2007 à 2010, nous avons testé un autre concept relationnel chez l'abeille : la configuration spatiale relative de différents éléments. Les insectes ont ainsi été confrontés à des images où un objet (variable) était situé tantôt au-dessus et tantôt au-dessous d'une barre horizontale, et entraînés à choisir celles où il était au-dessus *(voir la figure 2)*. On utilise une procédure identique pour tester ce concept chez les primates ou les enfants. On a ensuite compliqué la tâche, en supprimant la barre de référence ; dans ce dernier cas, deux objets quelconques étaient placés tantôt l'un au-dessus de l'autre, tantôt côte à côte. Divers tests ont permis de vérifier que les abeilles fondaient bien leur choix sur la position relative récompensée (ici « l'un au-dessus de l'autre ») et non sur d'autres éléments (similarités visuelles, orientation globale, position absolue des éléments dans l'image…).

Le plus étonnant est que les abeilles apprennent ces concepts relationnels bien plus vite que les primates : elles n'ont

Des abeilles physionomistes

Les abeilles peuvent apprendre à reconnaître des visages figurés par un assemblage de points et de traits. Elles se fondent sur l'aspect visuel global, mais peut-être aussi sur les relations spatiales entre les éléments (qui, séparément, ne seraient pas reconnus comme des yeux, un nez et une bouche). Ce type d'analyse rend la reconnaissance des formes plus fiable lors d'occultations partielles ou de changements d'angle de vue.

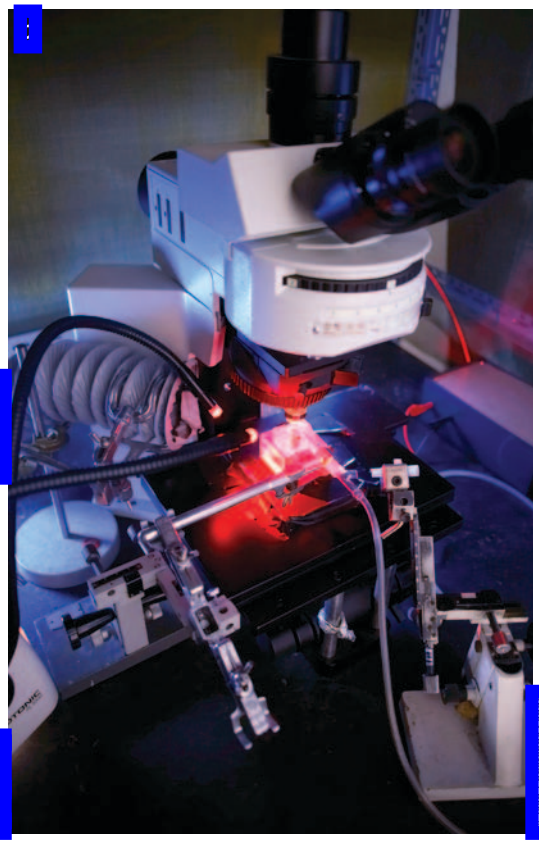
Apprendre à parler une danse étrangère

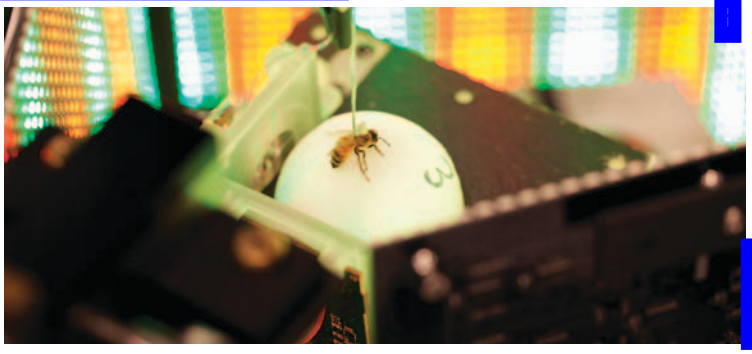
Dans les années 1940, l'éthologue autrichien Karl von Frisch, pionnier des recherches sur les abeilles, a découvert l'existence d'un « langage » chez cet insecte. Il est constitué d'une danse, grâce à laquelle les butineuses indiquent la direction et l'éloignement des sources de nourriture à leurs congénères. Pour une source éloignée, la danse forme un huit, dont l'inclinaison par rapport à la verticale traduit la direction par rapport au Soleil. En parallèle, la danseuse fait vibrer son abdomen à une fréquence qui renseigne sur l'éloignement de la source de nourriture : plus elle est élevée, plus la source est lointaine.

La capacité à communiquer est intéressante d'un point de vue évolutif, mais ne trahit pas nécessairement une intelligence très développée. En effet, elle peut être stéréotypée et innée. Cependant, en 2008, Su Songkun, de l'Université de Zhejiang, en Chine, et ses collègues, ont montré que les abeilles manifestent d'impressionnantes capacités d'apprentissage et d'adaptation, qui supposent une grande plasticité cérébrale. Pour ce faire, ils ont placé des abeilles européennes parmi des congénères asiatiques, dont la danse est calibrée différemment (la correspondance entre l'éloignement et la fréquence de vibration de l'abdomen n'est pas identique). En peu de temps, les nouvelles venues ont appris à « parler » la danse locale !

© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013

3. POUR VISUALISER LES AIRES cérébrales qui s'activent lors d'une tâche cognitive particulière, on immobilise les abeilles, on ouvre leur crâne et on injecte un colorant dans leur cerveau *(a)*. On leur fait ensuite réaliser la tâche souhaitée et on observe le cerveau au microscope *(b)*. La difficulté est que les insectes sont incapables de réaliser des tâches cognitives complexes quand ils sont immobilisés. On développe alors des simulateurs de marche *(c)* ou de vol. Un tel dispositif pourrait être utilisé pour des apprentissages complexes, en remplaçant les éclairages jaunes et blancs du fond par un écran où défilerait un paysage.





besoin que d'une trentaine d'essais, qui leur prennent environ deux heures, contre plusieurs centaines d'essais sur plusieurs jours pour les primates. En outre, les abeilles semblent les extraire « naturellement » des images perçues afin de les utiliser comme critère de classification : dans les expériences sur la configuration spatiale, elles ont ainsi dégagé une relation de différence sans que celle-ci soit récompensée. En effet, lors de l'apprentissage, les objets d'une même image étaient toujours différents, qu'ils soient liés par la relation spatiale récompensée (« l'un au-dessus de l'autre ») ou non. Or, quand on présentait par la suite aux abeilles des objets liés par cette relation, mais identiques, elles ne les choisissaient pas plus souvent que d'autres. Elles avaient donc intégré le concept relationnel « différent » comme critère de choix.

En quoi les concepts relationnels sont-ils utiles aux abeilles ? Plusieurs hypothèses ont été proposées. D'abord, ils permettent de classer par catégories les objets, les scènes et les événements bien plus efficacement qu'en se fondant juste sur des similarités perceptives. Selon une théorie controversée, l'abeille pourrait s'en servir pour établir une « carte mentale » de son environnement. En effet, quand elle connaît la localisation de deux sources de nourriture par rapport à la ruche, elle sait aller directement de l'une à l'autre sans avoir jamais effectué ce trajet, et ce dans un rayon de dix kilomètres autour de la ruche. Cette carte pourrait être fondée sur une représentation mentale des relations spatiales entre différents repères visuels perçus lors de ses déplacements, tels des arbres ou des poteaux – et donc sur des concepts relationnels.

Pour apprendre les concepts, les abeilles n'ont besoin que d'une trentaine d'essais, contre plusieurs centaines pour les primates

Ces concepts pourraient aussi permettre aux abeilles de reconnaître les objets malgré les variations d'angle de vue, de couleur et texture, ou quand ils sont partiellement cachés. Une telle reconnaissance est plus fiable quand l'analyse se fonde sur les relations spatiales entre les éléments qui composent l'objet (autrement dit, sur sa topologie ou sur sa configuration spatiale) plutôt que sur l'aspect de ces éléments.

L'utilisation des configurations spatiales pour la reconnaissance d'images a été presque exclusivement étudiée chez l'homme. Pourtant, une expérience réalisée en 2010, toujours au sein de l'équipe de M. Giurfa, suggère que les abeilles en sont aussi capables. Nous leur avons appris à reconnaître des configurations de type visage, obtenues à partir de ronds et de traits *(voir la figure page ci-contre)* : les insectes distinguaient quand ces éléments formaient un visage ou non. Même si les abeilles se fondent sans doute en partie sur les similarités perceptives globales entre les configurations spatiales, nous pensons qu'elles utilisent aussi les concepts relationnels – la disposition relative des éléments – dans le traitement de ce type d'images.

En outre, lorsqu'on leur laisse le choix des critères utilisés pour reconnaître une image complexe, les abeilles se reposent préférentiellement sur la configuration des éléments de l'image plutôt que sur leur analyse individuelle. Nous avons ainsi appris aux abeilles à reconnaître une grande forme dessinée par de petits éléments, tel un carré composé de petits losanges. Quand on soumet ensuite les insectes à un carré dessiné par de petits triangles et à un cercle dessiné par de petits losanges, ils choisissent le premier : ils se fondent

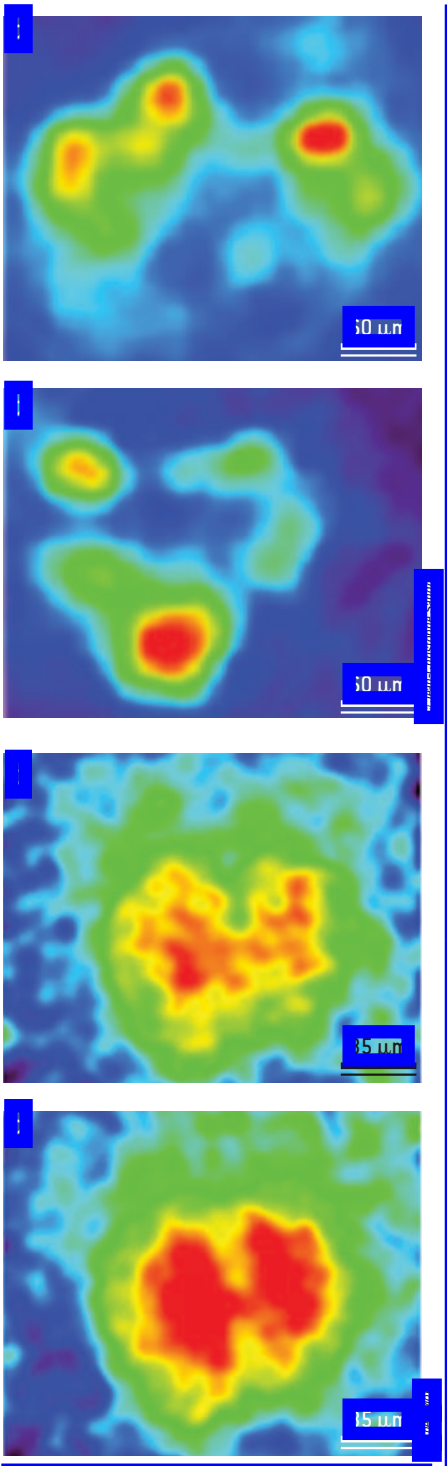
donc sur la configuration des éléments (la forme globale en carré qu'ils dessinent) plutôt que sur ces éléments eux-mêmes (leur forme de losange). C'est le cas aussi chez l'homme, mais pas chez les autres primates, dont la perception est dominée par le niveau élémentaire.

Enfin, l'utilisation de concepts relationnels par l'abeille pourrait n'être qu'un artefact des expériences, dû aux entraînements reçus. Le cerveau des abeilles est peut-être très plastique, facilitant tout type d'apprentissage, y compris celui de concepts. Cependant, quelques éléments laissent penser qu'elles manifestent aussi ce comportement dans la nature. Par exemple, comme nous l'avons souligné, elles ont extrait des relations entre les éléments sans que ces relations soient directement récompensées.

Quoi qu'il en soit, la manipulation de concepts relationnels est une tâche cognitive ardue. En effet, elle nécessite un réseau de neurones codant la relation (par exemple « sur »), qui s'active pour tous les cas mettant en jeu cette relation. Ce réseau doit être activé de la même façon quels que soient les objets concernés, par exemple par un chat *sur* un toit et une bouteille *sur* une table.

La co-activation de ce réseau et du circuit de détection du sucre permettrait à l'animal d'apprendre – lors des séances d'entraînement – la règle à suivre pour obtenir la récompense. Chez les abeilles, la recherche de nourriture stimulerait le recrutement d'un système neuronal codant les similarités relationnelles. Les raisons pour lesquelles ce processus est plus rapide que chez les primates (qui ont besoin de beaucoup plus d'essais pour apprendre un concept relationnel) sont mal connues. Est-ce que la complexité du cerveau de ces derniers entraîne de multiples traitements superflus, qui ralentissent l'élaboration des concepts ? Est-ce une question de motivation ? Une différence dans le codage neuronal des concepts ? Cela reste à déterminer.

Aucun réseau associé à un concept relationnel particulier n'a encore été localisé. Cependant, chez les primates, on pense que ces réseaux se situent dans le cortex préfrontal (à l'avant du cerveau), tandis que les catégories perceptives sont plutôt enregistrées dans le cortex temporal inférieur, siège de la reconnaissance des objets. En effet, des études d'imagerie cérébrale ont mis en évidence une activation du cortex préfrontal lors de tâches comportementales impliquant la manipulation de concepts



4. LES ÉTUDES D'IMAGERIE CÉRÉBRALE montrent que des odeurs et des couleurs différentes activent des zones distinctes, respectivement dans les lobes antennaires et dans le tubercule optique des abeilles (*a* et *b*, les zones activées par deux odeurs ; *c*, celle activée par le bleu et *d*, celle activée par le vert). De façon générale, la perception des odeurs et des couleurs n'est pas assurée par les mêmes aires cérébrales. Pourtant, l'abeille arrive à transférer à des odeurs une relation d'identité apprise avec des couleurs. Cette relation doit donc être codée séparément dans le cerveau.

relationnels (nombre, identité, relations spatiales…). Le cortex préfrontal est d'ailleurs le siège des fonctions cognitives supérieures (langage, raisonnement…) et est fortement développé chez les primates, en particulier chez l'homme. Il reçoit des informations sensorielles de toutes natures (visuelles, olfactives, gustatives, tactiles et auditives), après traitement par des aires sensorielles spécifiques et diverses régions du cerveau.

Le siège des concepts relationnels chez l'abeille serait donc à chercher dans une structure cérébrale équivalente, recevant des informations de tous les systèmes sensoriels après traitement dans les aires spécialisées. Précisons que cette aire et le cortex préfrontal ne sont pas homologues, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas issues d'une même structure chez l'ancêtre commun aux primates et aux insectes (qui auraient divergé il y a 600 millions à un milliard d'années). En effet, cet ancêtre n'avait pas de cerveau : c'était probablement un ver simple, doté seulement de quelques ganglions nerveux. Les cerveaux des insectes et des primates sont donc apparus de façon indépendante.

Les corps pédonculés, siège des concepts ?

Chez l'abeille, une aire cérébrale nommée corps pédonculés pourrait être cet équivalent du cortex préfrontal et traiter les concepts (*voir la figure 5*). En effet, elle reçoit tous les types d'informations sensorielles. En outre, cette aire est particulièrement développée chez l'abeille, ainsi que chez les autres hyménoptères (telles les guêpes et les fourmis), les scarabées et les cafards. Dans le cas de ces deux derniers insectes, le développement des corps pédonculés serait dû à des stratégies variées de recherche alimentaire, nécessitant une grande diversité de comportements. Chez les hyménoptères, on attribue ce développement à la vie sociale, impliquant des interactions complexes ; il aurait ensuite permis un traitement cognitif élaboré des données visuelles. Le même phénomène se serait produit avec le cortex préfrontal des primates. Il est aussi possible que la complexification du traitement cognitif de l'environnement visuel se soit déroulée en même temps que la sociabilisation et ait aussi entraîné le développement des corps pédonculés.

Toutefois, le rôle des corps pédonculés reste mal connu. On a seulement montré qu'ils interviennent dans la mémorisa-

© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013

ion olfactive. Lors de plusieurs études menées au cours des années 2000, on a appris aux abeilles à associer une odeur à une récompense sucrée et on a observé le rôle des corps pédonculés dans la mémorisation : lorsque cette structure cérébrale était détruite ou inhibée par des substances chimiques, les abeilles ne parvenaient plus à mémoriser les odeurs.

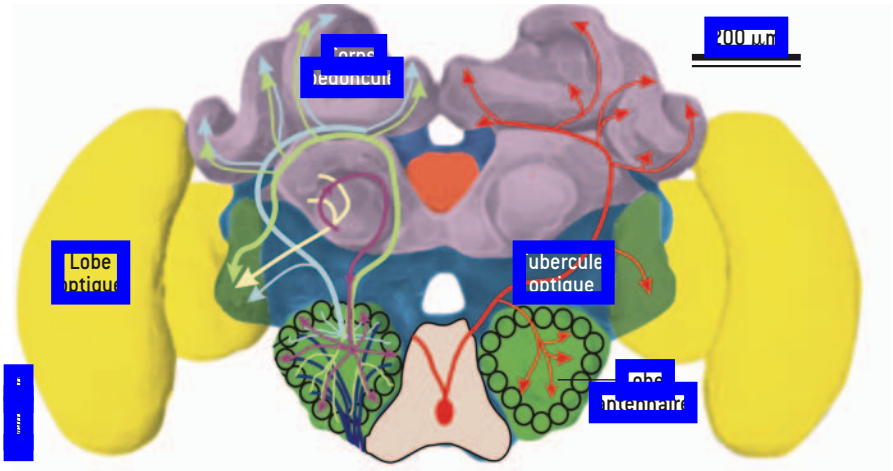
Pour trouver les bases neuronales des concepts, la première étape est donc de vérifier l'implication des corps pédonculés. Plusieurs laboratoires pensent lancer des projets en ce sens dans l'année à venir. Ils devraient obtenir des résultats au cours des deux ou trois prochaines années.

Comment observer le cerveau des abeilles en fonctionnement ? Les techniques d'imagerie par résonance magnétique (IRM) sont inapplicables, car leur résolution est de l'ordre du millimètre, et le cerveau de l'abeille mesure moins de un millimètre cube. En revanche, la robustesse de l'abeille autorise les méthodes invasives. On réalise donc de l'imagerie cérébrale en ouvrant la cuticule (la carapace) du crâne (une opération indolore, cette cuticule n'étant pas innervée), puis en injectant un colorant dans le cerveau : cette substance se colore en présence des ions calcium libérés par les neurones lorsqu'ils émettent des impulsions électriques. On observe alors le cerveau de l'abeille au microscope *(voir la figure 3)*.

Observer le cerveau des abeilles

On utilise également l'électrophysiologie : cette technique consiste à mesurer directement l'activité de neurones et d'ensembles de neurones en implantant des électrodes dans le cerveau des insectes. La pointe de l'électrode est placée soit à la surface du neurone, soit à l'intérieur.

La seule limitation, en passe d'être résolue, est la difficulté d'étudier des apprentissages complexes sur des abeilles immobilisées en laboratoire. Cette immobilisation est nécessaire pour l'imagerie cérébrale et l'enregistrement de l'activité du cerveau. Or une abeille immobilisée peine à apprendre de simples couleurs et est incapable de mémoriser des concepts relationnels. Une solution en cours de développement serait d'utiliser des simulateurs de vol ou de marche, qui donneraient l'impression d'un mouvement libre à l'abeille immobilisée.



5. LES CORPS PEDONCULES *(en violet)* pourraient être l'aire cérébrale responsable des concepts relationnels chez l'abeille. En effet, ils sont très développés et reçoivent des informations de multiples zones du cerveau – à l'instar du cortex préfrontal des primates, qui sous-tend les fonctions cognitives supérieures chez ces animaux.

Des dispositifs de ce type ont déjà été développés par plusieurs équipes de l'Université de Queensland, en Australie. Dans l'un d'eux, l'abeille est collée à une tige qui la maintient sur une boule tournant quand elle marche. L'analyse des mouvements de la boule, maintenue en suspension par un flux d'air, renseigne sur la direction dans laquelle l'abeille veut se diriger et sur sa vitesse. Nous voudrions utiliser un simulateur de marche de ce type, avec un écran cylindrique où serait projetée une image qui bougerait en fonction des mouvements de l'abeille. Le simulateur de marche semble suffire à autoriser des apprentissages complexes et est plus simple et moins coûteux qu'un simulateur de vol.

En parallèle, des modélisations de ces apprentissages devront être réalisées pour comprendre leurs fondements neuronaux. Dans une telle modélisation, un neurone virtuel intègre des stimulations excitatrices ou inhibitrices en provenance d'autres neurones. Quand un certain seuil d'excitation est atteint, il envoie un message excitateur ou inhibiteur à d'autres neurones.

En 2011, l'équipe de Barbara Webb, de l'Université d'Édimbourg, en Écosse, a obtenu des premiers résultats pour des apprentissages simples (la mémorisation d'odeurs) chez la drosophile, dont le cerveau est bien moins complexe que celui de l'abeille. Dans sa simulation, la perception d'une molécule odorante entraînait l'activation d'un ensemble de neurones, chacun réagissant à une caractéristique chimique particulière. Lorsque cet ensemble était activé en même temps que les neurones détectant la récompense sucrée (ce qui se produit quand les abeilles trouvent cette récompense en même temps qu'elles perçoivent l'odeur), les synapses connectant les neurones en jeu étaient potentialisées, c'est-à-dire qu'elles devenaient plus efficaces pour transmettre le signal. Après quelques essais virtuels, l'activation du circuit neuronal codant l'odeur suffisait à activer celui de la détection du sucre. C'est ainsi qu'un insecte réel serait attiré vers la source de l'odeur.

B. Webb a déduit de ses travaux qu'un grand nombre de neurones n'est pas nécessaire pour mémoriser une odeur : c'est le nombre de synapses qui importe. Des projets sont en cours d'élaboration pour simuler l'encodage d'apprentissages plus complexes, tels ceux de catégories perceptives, chez les abeilles.

Le cas des abeilles montre que la manipulation de concepts relationnels n'est pas l'apanage des vertébrés. L'étude de ces facultés chez l'insecte devrait nous renseigner sur la complexité cérébrale minimale permettant d'atteindre de tels niveaux cognitifs. Enfin, elle ouvre des perspectives dans le domaine de l'intelligence artificielle et de la reconnaissance visuelle par ordinateur. La rapidité avec laquelle l'abeille apprend les concepts relationnels montre qu'elle a développé des mécanismes cérébraux efficaces pour effectuer cette tâche. Quand nous les aurons mieux compris, nous pourrons nous en inspirer pour concevoir des logiciels de reconnaissance visuelle susceptibles d'être utilisés notamment dans les robots miniatures. ■

© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013

Des CLÉS moléculaires pour les cellules

La membrane des cellules est infranchissable pour nombre de molécules présentant un intérêt thérapeutique. De petits fragments de protéines découverts dans les années 1990 pourraient leur permettre d'accéder à l'intérieur des cellules.

Roland Brock et Wouter Verdurmen

Ces dernières années, le nombre de nouvelles molécules ayant un intérêt thérapeutique n'a cessé de croître. Toutefois, un obstacle majeur limite le développement de nouveaux médicaments : parmi ces molécules, rares sont celles qui franchissent la membrane des cellules et en atteignent l'intérieur, où elles pourront remplir leur rôle. Couplage avec des lipides, ajout de molécules agissant sur les membranes cellulaires, perméabilisation électrique des tissus *in vivo*, diverses méthodes ont été développées pour faciliter l'entrée de ces molécules dans les cellules. Toutefois, ces méthodes perturbent les cellules ou restent peu efficaces.

Une autre voie, cependant, semble prometteuse : certains fragments de protéines – ou peptides – facilitent l'absorption, par les cellules, des molécules auxquelles ils sont liés, et ce sans perturber la membrane cellulaire. L'histoire de leur découverte a été riche en rebondissements, et la piste a même failli être abandonnée. Néanmoins, les multiples preuves de son efficacité et de son innocuité laissent penser qu'elle pourrait devenir un outil important de la recherche pharmaceutique.

L'intérêt pour ces peptides particuliers a commencé au début des années 1990, lorsque deux biologistes de l'École normale supérieure, à Paris, Alain Prochiantz et Alain Joliot, ont découvert une étonnante propriété d'une protéine impliquée dans le développement des neurones chez la drosophile et nommée antennapedia. La protéine induit la production de cellules neuronales à partir de cellules non spécialisées – un processus nommé différenciation neuronale –, et les deux biologistes cherchaient à préciser le mécanisme en jeu en reproduisant son action sur des cellules en culture.

Pour introduire la protéine dans ces cellules, ils ont rendu les membranes cellulaires légèrement perméables par addition de certaines substances, car dans des conditions normales de culture, les cellules n'absorbent pas facilement des molécules aussi grandes que des protéines. À leur grande surprise, cependant, A. Prochiantz et A. Joliot ont constaté que la protéine antennapedia pénétrait même dans les cellules intactes, non perméabilisées, où elle activait la différenciation neuronale. La protéine avait donc atteint sa cible, le noyau cellulaire, où elle jouait son rôle dans la régulation des gènes.

Peu après cette découverte, en 1994, la même équipe a montré qu'antennapedia traverse la membrane des cellules grâce à une petite région de la protéine. Et qu'un

L'ESSENTIEL

- La membrane des cellules ne laisse passer que peu de molécules, en général de petite taille et non chargées.
- Les biologistes cherchent un moyen de faire pénétrer de façon ciblée dans certaines cellules des molécules plus grandes à effet thérapeutique, telles que de l'ADN ou des protéines.
- Des fragments de protéines nommés peptides de pénétration cellulaire apportent une solution prometteuse, car même associés à une macromolécule, ils entrent facilement dans les cellules.

© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013

peptide de 16 acides aminés (les constituants des protéines) synthétisé à l'image de ce domaine était aussi capable de franchir la membrane des cellules. La synthèse d'un fragment de protéine aussi court est facile et rentable. De la description de ce « peptide de pénétration cellulaire » (*cell penetrating peptide* ou CPP) nommé pénétratine par ses découvreurs à la recherche d'applications biotechnologiques, il n'y avait qu'un pas : si ce peptide, une fois couplé à d'autres molécules, assurait leur entrée dans les cellules, les perspectives seraient nombreuses. Le premier succès fut le transport d'un peptide qui inhibe une enzyme, la protéine kinase C.

Les biologistes ont aussi recherché les propriétés structurelles conférant au peptide pénétratine sa capacité de transporteur. Ils eurent rapidement la réponse. Deux ingrédients étaient nécessaires pour une absorption efficace des molécules dans les cellules : des chaînes d'acides aminés portant une charge électrique positive et quelques longues chaînes d'acides aminés hydrophobes.

Des peptides qui pénètrent dans les cellules

Dès 1988, Maurice Green et Paul Lowenstein, à l'Université de Saint Louis, dans le Missouri aux États-Unis, ainsi qu'Alan Frankel et Carl Pabo, de l'Université Johns Hopkins, à Baltimore dans le Maryland, avaient publié des observations similaires avec la protéine TAT du virus de l'immunodéficience humaine (VIH) : les cellules absorbaient spontanément la protéine, qui y activait alors la transcription des gènes du virus.

L'équipe de Bernard Lebleu, de l'Institut de génétique moléculaire de Montpellier, identifia par la suite dans la protéine TAT un domaine de 11 acides aminés responsable du processus. Ce fragment a ensuite été étudié plus en détail, lui aussi en tant que peptide de pénétration cellulaire.

Les observations de la pénétration dans les cellules ont immédiatement suscité un grand intérêt en biotechnologie, car elles réfutaient un dogme selon lequel les grosses molécules hydrophiles (ayant une affinité pour l'eau) ne pouvaient pas accéder au milieu intérieur de la cellule, le cytoplasme, sans endommager la membrane. C'était ce qu'avaient montré notamment des essais antérieurs, réalisés avec des peptides et des polymères agissant sur la membrane. Ces molécules, qui ressemblent par certaines propriétés aux peptides de pénétration cellulaire, facilitent certes l'entrée de protéines dans les cellules, mais ce faisant, elles perturbent les membranes, parfois s'y incorporant et modifiant leurs propriétés jusqu'à les détruire.

Ainsi, Hugues Ryser et Ronald Hancock, de l'Université Harvard à Boston, avaient montré dès 1965 qu'en présence de chaînes composées de nombreux acides aminés portant une charge positive – une succession d'acides aminés lysine (ou polylysine), par exemple –, la protéine albumine pénètre plus de 50 fois mieux dans les cellules. Et la même expérience reproduite dans les années 1970 avec la polylysine couplée à des protéines et à des molécules plus petites que l'albumine a donné des résultats similaires. Toutefois, il s'est révélé que les polymères de lysine endommagent les cellules en raison de leur effet sur la membrane, à l'instar des peptides testés avant la découverte des peptides de pénétration cellulaire.

En revanche, le transport de molécules couplées à ces nouveaux peptides est bien moins perturbant pour les cellules. Ces peptides rendent le cytoplasme accessible à des molécules qui, de par leurs propriétés, ne peuvent diffuser à travers la membrane et pour lesquelles il n'existe pas non plus de canaux ou de transporteurs membranaires. Ces molécules sont par exemple de courtes séquences d'ADN ou d'ARN – des oligonucléotides –, tels les petits ARN interférants (ARNi) qui contrôlent l'activité des gènes, mais aussi des protéines, des peptides et même des nanoparticules *(voir la figure 2)*.

LES AUTEURS

Roland BROCK, professeur de biochimie, dirige le Département de biochimie du Centre médical de l'Université Radboud, à Nimègue aux Paus-Bas.

Wouter VERDURMEN a soutenu sa thèse en octobre dernier au sein de l'équipe de Roland Brock. Il est actuellement postdoctorant à l'Université de Zurich, en Suisse.

BIBLIOGRAPHIE

P. Boisguerin *et al.*, **CPP-conjugated anti-apoptotic peptides as therapeutic tools of ischemia-reperfusion injuries,** *Curr. Pharm. Des.*, vol. 19, pp. 2970-2978, 2013.

F. Milletti, **Cell-penetrating peptides: classes, origin and current landscape,** *Drug Discovery Today*, vol. 17, pp. 850-860, 2012.

S. El Andaloussi *et al.*, **Cell-penetrating peptides-based strategies for the delivery of splice redirecting antisense oligonucleotides,** *Methods Mol. Biol.*, vol. 764, pp. 75-89, 2011.

W. P. Verdurmen et R. Brock, **Biologigal responses towards cationic peptides and drug carriers,** *Trends in Pharm. Sc.*, vol. 32, pp. 116-124, 2011.

P. Jarver *et al.*, **In vivo biodistribution and efficacy of peptide mediated delivery,** *Trends in Pharm. Sc.*, vol. 31, pp. 528-535, 2010.

Les peptides de pénétration cellulaire constituent donc une aide universelle pour importer des macromolécules à visée thérapeutique dans les cellules. La membrane cellulaire ne laisse passer que très peu de molécules. De par sa structure et ses propriétés chimiques, elle sert de barrière hautement sélective et contrôle ainsi la composition du cytoplasme. Alors que les surfaces interne et externe de la membrane portent des charges électriques et sont hydrophiles, l'intérieur de la membrane, constitué d'acides gras, est hydrophobe. C'est pourquoi seules de petites molécules non chargées et hydrophobes réussissent à traverser la membrane : les molécules chargées sont repoussées ou se collent à la surface de la membrane, tandis que les molécules hydrophiles sont repoussées par les chaînes grasses dont est formé l'intérieur de la membrane. Toutes les molécules chargées ou, plus précisément, les grandes molécules polaires (c'est-à-dire dont les charges sont réparties de façon asymétrique) nécessitent des canaux ou des molécules de transport pour franchir la membrane.

Une absorption directe ?

Or il n'existe aucun transporteur de ce type pour les macromolécules telles que les oligonucléotides, les peptides ou les protéines. Leur seul moyen d'entrer dans la cellule est l'endocytose. Au cours de ce processus, les cellules capturent des molécules et des particules du milieu qui les entoure à l'aide de récepteurs à leur surface (ou parfois sans récepteur), puis les enferment dans des vacuoles formées à partir de la membrane, nommées endosomes. Les endosomes fusionnent avec d'autres vacuoles, les lysosomes, lesquelles contiennent des enzymes qui dégradent les macromolécules telles que les protéines ou l'ADN. De ce fait, seuls les éléments constitutifs de ces macromolécules, c'est-à-dire des acides aminés ou des nucléotides, arrivent dans le cytoplasme. Cette voie d'accès est donc peu utile pour importer des molécules thérapeutiques : avant que ces dernières puissent remplir leur fonction, la plupart sont détruites.

On comprend d'autant mieux l'enthousiasme suscité par la découverte des peptides de pénétration cellulaire que les premières recherches sur leur mode d'entrée ont permis de conclure à une importation directe de ces peptides et de leur chargement dans le cytoplasme, sans endocytose. D'après le modèle de l'époque, les peptides provoquaient une perturbation minime de la structure membranaire, suffisante pour laisser passer le peptide et son chargement à travers la membrane jusque dans le cytoplasme, mais trop faible pour perturber le fonctionnement de la cellule.

Une série de résultats étayait le modèle. Notamment, deux observations allaient à l'encontre d'un mécanisme d'endocytose par récepteur. D'une part, que le peptide de pénétration cellulaire ait été synthétisé à partir d'acides aminés dits L ou à partir de leurs images dans un miroir (acides aminés dits D), son absorption restait constante. Or un récepteur spécifique du peptide L ne peut reconnaître le peptide D correspondant. D'autre part, même à des concentrations élevées, les quantités de molécules transférées dans la cellule ne tendaient pas vers un maximum : le mécanisme d'entrée n'était jamais saturé au point de se bloquer, contrairement à l'endocytose par récepteur, limitée par le nombre de récepteurs à la surface de la cellule.

En outre, l'importation n'était pas non plus perturbée par des conditions qui bloquent l'endocytose, telles que l'augmentation de la rigidité de la membrane par refroidissement ou la suppression des molécules qui fournissent l'énergie nécessaire au processus. Ainsi, alors que l'endocytose est stoppée par une baisse de la température des cellules à 4 °C ou par une pénurie des molécules qui transportent l'énergie, l'absorption *via* des peptides de pénétration cellulaire n'était pas perturbée. Enfin, des études physicochimiques visant à déterminer les interactions des peptides avec la membrane, ainsi que des expériences réalisées sur des modèles de membrane confortaient l'hypothèse d'une absorption directe. Ainsi, à la fin des années 1990, le mécanisme d'importation des peptides de pénétration cellulaire paraissait élucidé.

La pénétration se fait par endocytose

Les choses se sont alors compliquées. Tout d'abord, en 1999, nous avons obtenu un résultat inattendu. Nous avions voulu utiliser de tels peptides pour étudier les interactions des protéines à l'intérieur des cellules, mais nos premiers travaux ont tout de suite remis en question la représenta-

© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013

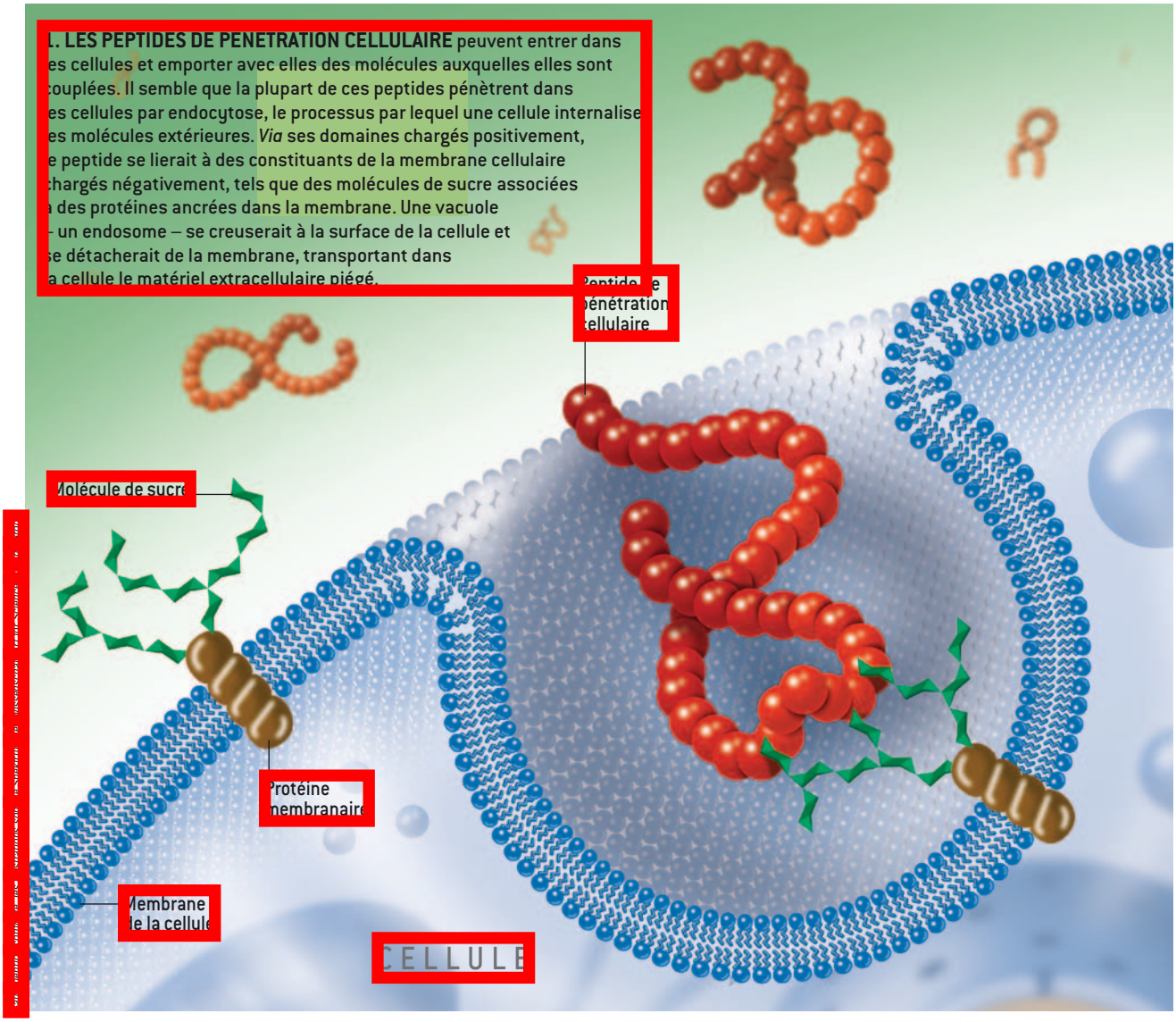
ion établie, selon laquelle l'absorption par les cellules serait indépendante du chargement : dans nos expériences, les quantités importées variaient notablement lorsqu'on modifiait quelques acides aminés du peptide transporté.

Puis en 2003, une nouvelle étude de l'équipe de B. Lebleu a marqué un tournant dans la recherche sur les peptides de pénétration cellulaire. Les biologistes de Montpellier se sont aperçus que la technique qui permet de conserver les cellules entre lame et lamelle et de les observer au microscope, la fixation, influe sur la répartition des peptides dans la cellule. La fixation, qui agit par coagulation ou précipitation de certains composants cellulaires, consiste à immobiliser les cellules en les conservant dans un état le plus proche possible de leur état naturel. Or jusqu'alors, presque toutes les expériences d'absorption de peptides avaient été analysées sur cellules fixées, car pour les besoins de la microscopie, les peptides étaient marqués par un colorant qui ne pouvait accéder au milieu intracellulaire qu'après fixation.

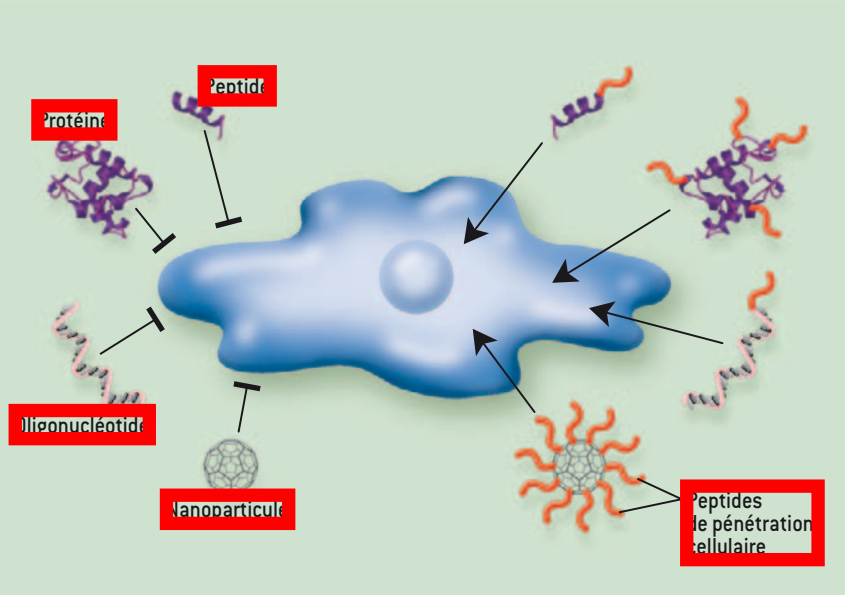
Ainsi, selon B. Lebleu et ses collègues, les preuves expérimentales d'une absorption directe reposaient en grande partie sur un effet secondaire de la fixation : ce processus endommage les membranes, ce qui permet aux peptides d'accéder au cytoplasme, qu'ils se soient trouvés à la surface de la cellule ou déjà à l'intérieur, au sein d'endosomes. Une fois dans le cytoplasme, les peptides se répartissent uniformément, puis se lient à des protéines. Ce scénario explique aussi pourquoi, dans les expériences précédentes, le froid ou le manque d'énergie n'avaient pas inhibé l'absorption : dans ces conditions, les peptides se fixaient à la face externe des cellules et accédaient ensuite à l'intérieur de la cellule grâce à la fixation.

En revanche, lorsque les biologistes ont reproduit l'expérience dans des cellules en culture, non fixées, avec des peptides couplés à une molécule fluorescente, ils ont observé au microscope des points lumineux révélant des vacuoles intracellulaires qui n'étaient autres que… des endosomes. Et lorsqu'ils bloquaient l'endocytose, par exemple par le froid, la coloration des endosomes était plus faible.

Cela signifie que les peptides pénètrent dans la cellule non pas en traversant directement la membrane, mais essentiellement par un mécanisme d'endocytose sans récepteur. En revanche, l'absorption de la protéine Antennapedia semble bien directe, comme décrite dans les années 1990.



1. LES PEPTIDES DE PENETRATION CELLULAIRE peuvent entrer dans les cellules et emporter avec elles des molécules auxquelles elles sont couplées. Il semble que la plupart de ces peptides pénètrent dans les cellules par endocytose, le processus par lequel une cellule internalise des molécules extérieures. *Via* ses domaines chargés positivement, le peptide se lierait à des constituants de la membrane cellulaire chargés négativement, tels que des molécules de sucre associées à des protéines ancrées dans la membrane. Une vacuole – un endosome – se creuserait à la surface de la cellule et se détacherait de la membrane, transportant dans la cellule le matériel extracellulaire piégé.



2. DES MOLÉCULES HABITUELLEMENT INCAPABLES DE TRAVERSER la membrane cellulaire – peptides, protéines, oligonucléotides, et même nanoparticules – y parviennent à l'aide de peptides de pénétration cellulaire. Ce mécanisme élargit la recherche de nouveaux médicaments à toutes ces classes de molécules, alors qu'elle était cantonnée auparavant aux petites molécules, seules capables de traverser la membrane cellulaire.

D'autres recherches avaient indiqué l'existence d'une absorption par endocytose, mais ce fut cette étude-là qui réorienta profondément les recherches sur les peptides de pénétration cellulaire. Jusqu'alors, ces peptides étaient considérés avant tout comme des outils moléculaires d'utilisation simple. Et voilà qu'ils devenaient des éléments absorbés par endocytose, un processus complexe qui aboutit le plus souvent à une destruction, dans les lysosomes, des molécules absorbées avec eux. En outre, plusieurs expériences menées sur de tels peptides n'ont pas donné les résultats espérés, ce qui a renforcé les doutes concernant la méthode.

Ces revers auraient pu sonner la fin des recherches menées sur les peptides de pénétration cellulaire. Au lieu de cela, les scientifiques ont redoublé d'efforts dans des directions très diverses. La recherche sur ces peptides devint interdisciplinaire et inclut la chimie, la pharmacologie et la biologie cellulaire. Plusieurs facteurs ont contribué à ce développement surprenant.

D'une part, l'existence d'une absorption efficace par endocytose sans récepteur était en soi une découverte importante. D'autre part, des peptides de pénétration cellulaire avaient déjà fait leurs preuves. Il semblait donc que cela fonctionnait malgré tout. Le défi consistait désormais à comprendre les causes du succès et à les transposer à d'autres situations. De plus, entre-temps avaient été mises au point des techniques pour libérer le contenu des endosomes dans le cytoplasme avant que les molécules internalisées ne soient dégradées dans les lysosomes. Il suffisait d'adapter ces stratégies aux conditions expérimentales des peptides de pénétration cellulaire.

Par ailleurs, le besoin d'un outil permettant de faire entrer des macromolécules dans les cellules se faisait de plus en plus pressant en pharmacologie. Notamment, des oligonucléotides permettant d'inactiver des gènes – en l'occurrence avant tout les ARN interférants évoqués plus haut – s'étaient révélés particulièrement prometteurs dans le traitement de certaines maladies, et on espérait les amener au contact de leur cible à l'aide de peptides de pénétration cellulaire. Plus que jamais, l'objectif était de s'affranchir des limites fixées par l'utilisation de petites molécules, afin de lancer le développement de nouveaux médicaments à base de macromolécules.

Près de 100 peptides identifiés

Depuis, un nombre croissant d'équipes, principalement en Europe, aux États-Unis et au Japon, ont identifié près de 100 peptides de pénétration cellulaire et des variantes de certains peptides déjà connus. Plusieurs mécanismes d'absorption ont été mis en évidence, qui dépendent du peptide, de son chargement et de la concentration utilisée. Par exemple, couplées à des peptides de pénétration cellulaire, des petites molécules peu hydrophiles, telles que les substances actives anticancéreuses, sont directement absorbées à travers la membrane. En revanche, dans le cas de macromolécules telles que des protéines, l'internalisation a lieu par endocytose. Par ailleurs, pour une raison encore inconnue, l'efficacité d'un peptide varie selon le type cellulaire. Mais un peptide bien choisi permettrait de cibler une population de cellules particulière, par exemple des cellules cancéreuses, ce qui diminuerait le risque d'effets indésirables.

Les processus moléculaires de l'absorption d'un peptide de pénétration cellulaire ne sont pas encore entièrement expliqués. Le peptide se fixe d'abord sur la membrane cellulaire, étape au cours de

Glossaire

Membrane cellulaire
Membrane qui entoure la cellule, composée d'une double couche de lipides dans laquelle s'insèrent diverses protéines (récepteurs, canaux, etc.).

Cytoplasme
Ensemble du matériel (hors noyau) que contient la cellule

Peptide
Courte chaîne d'acides aminés, les constituants des protéines.

Oligonucléotide
Court fragment d'ADN ou d'ARN

© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013

aquelle la liaison de domaines du peptide chargés positivement à des charges négatives présentes sur la membrane joue un rôle important. Ces charges négatives se trouvent par exemple sur des molécules de sucre, associées aux éléments constitutifs de la membrane *(voir la figure 1)*. La façon exacte dont la fixation du peptide à la surface externe de la membrane entraîne ensuite l'absorption reste à découvrir. On sait seulement que certains peptides provoquent une réorganisation du squelette de la cellule, ou cytosquelette, un ensemble de filaments qui sous-tendent la membrane de la cellule et lui confèrent sa forme.

À l'intérieur des endosomes, une grande partie des molécules couplées aux peptides de pénétration cellulaire sont dégradées et peu arrivent intactes dans le cytoplasme. Leur quantité dépend du peptide utilisé (ce qui détermine de façon décisive la qualité du peptide en tant que facteur d'importation). C'est pourquoi les chercheurs ont développé des stratégies pour faciliter la libération du contenu des endosomes.

Deux stratégies sont utilisées. D'une part, des modifications structurelles du peptide suffisent parfois à libérer les macromolécules associées dans le cytoplasme avant qu'elles n'atteignent les lysosomes. Elles consistent à ajouter au peptide des groupes chimiques qui réagissent à l'acidité, le contenu des endosomes étant plus acide (*p*H égal à 5) que le cytoplasme (*p*H égal à 7). D'autre part, on peut associer aux peptides de pénétration cellulaire des molécules qui déstabilisent la membrane des endosomes. Cette seconde stratégie a pris exemple sur le virus de la grippe, dont le matériel génétique, après endocytose, se libère très efficacement dans le cytoplasme, grâce à certains domaines protéiques qui déstabilisent les membranes.

Traverser la barrière hémato-encéphalique ?

La perspective de pouvoir introduire dans les cellules, grâce à ces peptides, des molécules jusqu'ici non utilisables en thérapeutique a permis aux chercheurs de procéder aussitôt aux premiers essais chez la souris. Lors d'une expérience clé de ce domaine de recherche, l'équipe de Steven Dowdy, qui travaillait alors à l'Institut médical Howard Hugues et à l'Université de Washington, aux États-Unis, a réussi à introduire dans les cellules de souris une enzyme couplée au peptide TAT. Après avoir injecté l'enzyme à l'animal, les scientifiques l'ont détectée dans tous les tissus, y compris le cerveau. Cette étude suggère que l'enzyme, non seulement avait pénétré dans les cellules de tous les tissus, mais avait aussi franchi la barrière physiologique qui sépare le système nerveux central de la circulation sanguine – la barrière hémato-encéphalique, filtre particulièrement sélectif qui protège le cerveau des agents pathogènes. Ce résultat reste toutefois à confirmer.

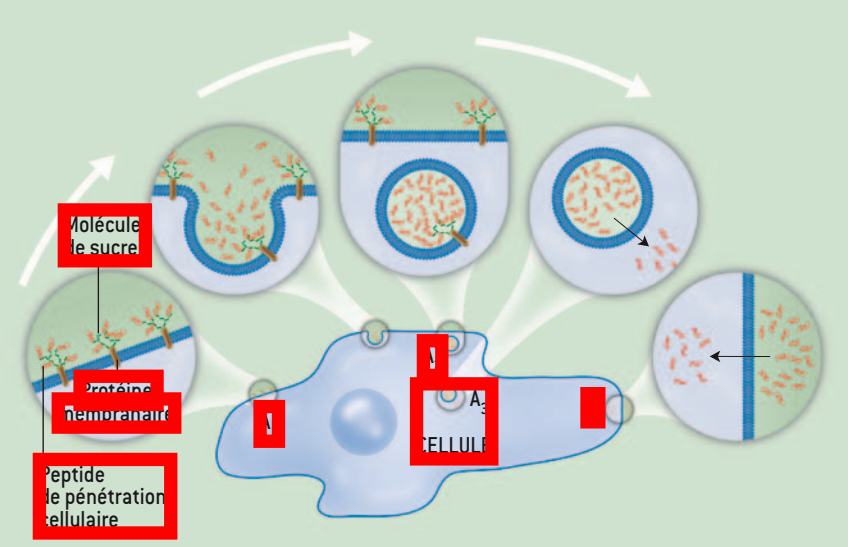
Encouragés par ces premières résultats, diverses équipes universitaires et entreprises de biotechnologie ont entrepris des études chez la souris et chez l'homme. La société américaine *Psorban* a été la première à tester un peptide hepta-arginine couplé à l'immunosuppresseur cyclosporine (cette molécule bloque la réponse immunitaire), pour une utilisation sur la peau en cas de psoriasis, une maladie auto-immune. Mais les résultats ont été décevants.

L'utilisation de nucléotides couplés à un peptide de pénétration cellulaire dans le traitement de la myodystrophie de Duchenne semble en revanche plus prometteuse. Cette maladie génétique entraîne une faiblesse musculaire à issue fatale, en particulier chez les garçons. L'objectif est de corriger un défaut d'épissage alternatif le mécanisme qui permet de produire

Endocytose
Mécanisme par lequel la cellule internalise des molécules extérieures : des vacuoles remplies de liquide extracellulaire, les endosomes, se creusent à sa surface, se détachent et migrent dans la cellule.

Lysosome
Vacuole dans laquelle des protéines et des nucléotides sont dégradés en leurs constituants.

Épissage alternatif
Processus par lequel, après transcription d'un gène, l'intermédiaire – un ARN messager mature – est obtenu par excision de certains segments d'ARN. Une mutation du gène peut perturber son déroulement, de sorte que l'ARN messager produit ne permette pas la synthèse d'une protéine fonctionnelle.



3. LES PEPTIDES DE PENETRATION CELLULAIRE accèdent à l'intérieur de la cellule par différents mécanismes. Le principal est l'endocytose *(A1 à A3)*. Des molécules présentant des charges positives se lient à la surface de la cellule grâce à la présence de sucres portant des charges négatives, localisés sur des protéines de la membrane *(A1)*. Après endocytose *(A2)*, les peptides et leur éventuel chargement accèdent au cytoplasme *(A3)*. Un autre mécanisme, plus rare, est le passage direct à travers la membrane *(B)*.

Vers des applications thérapeutiques

À Montpellier, deux groupes de recherche ont indépendamment débuté des travaux pionniers pour surmonter les problèmes d'internalisation de biomolécules en utilisant des peptides de pénétration cellulaire. Leurs études visent le traitement de diverses pathologies.

L'équipe de Bernard Lebleu a développé le peptide TAT (48-60) issu du virus de l'immunodéficience humaine, qui reste aujourd'hui l'un des peptides de pénétration cellulaire les plus étudiés. Cette équipe a aussi contribué à la caractérisation *in vitro* et *in vivo* de nouveaux peptides riches en acide aminé arginine, en collaboration avec l'équipe de Michael Gait, de l'Université de Cambridge. Ces peptides internalisés par endocytose sont associés à des molécules actives *via* une stratégie dite covalente mettant en jeu la formation d'une liaison chimique entre le peptide vecteur et la molécule à transférer dans les cellules. Deux exemples, en particulier, ont donné des résultats encourageants : des oligonucléotides construits pour empêcher la traduction anormale de séquences ARN dans le traitement de la myopathie de Duchenne, et des peptides cardioprotecteurs pour le traitement des lésions du myocarde à la suite d'un infarctus. Dans les deux cas, des résultats prometteurs ont été obtenus après injection dans des modèles animaux, avec d'intéressantes perspectives d'applications cliniques.

De son côté, l'équipe de Gilles Divita a été la première à utiliser des vecteurs peptidiques pour le transport de biomolécules dans les cellules *via* une stratégie non covalente. Les peptides utilisés, dits amphipathiques, présentent à la fois un groupe hydrophile et un groupe hydrophobe. Courts, ils sont capables de former des nanostructures non covalentes stables avec les molécules biologiques. Ces peptides permettent le transport de biomolécules dans de nombreux types cellulaires sans altérer leur fonction biologique, selon un mécanisme indépendant de l'endocytose, contrôlé par le potentiel électrique de la membrane et sa fluidité. Ces peptides vecteurs ont été utilisés avec succès *ex vivo* et *in vivo* pour transporter différents types de biomolécules actives (peptides, protéines, acides nucléiques, ARN interférants).

Un peptide de pénétration cellulaire *(en vert)* a été internalisé dans le cytoplasme de cellules isolées de cœur de souris non fixées *(en rouge, les membranes de la cellule et en bleu, le noyau cellulaire)*.

Aujourd'hui, ces deux équipes ont fusionné pour réunir leurs savoir-faire dans le développement de vecteurs peptidiques comme système de transport de biomolécules prometteuses sur le plan pharmacologique. L'une des principales difficultés restant à surmonter est le manque de spécificité tissulaire des peptides de pénétration cellulaire, c'est-à-dire l'absence de distinction entre les tissus sains et malades. Une piste envisagée est de les combiner avec des peptides conçus spécifiquement pour cibler une destination cellulaire, en particulier les tissus cancéreux *(homing peptides)*. L'adressage spécifique de l'ensemble peptide vecteur-molécule active dans certains types cellulaires est la seule façon d'assurer une répartition optimale des entités thérapeutiques dans les cellules malades tout en limitant leurs effets indésirables.

Prisca Boisguerin, Sébastien Deshayes, Gilles Divita et Bernard Lebleu
CRBM, CNRS UMR 5237, DIMNP, CNRS UMR 5235 et Université Montpellier 2

plusieurs protéines à partir d'un même gène) intervenant dans la traduction d'un certain gène. Dans ce cas, des études précliniques ont permis d'obtenir quelques succès. De plus, ni chez la souris ni chez l'homme, les peptides de pénétration cellulaire n'ont entraîné jusqu'ici d'effets indésirables, ce que confirme la très faible toxicité observée dans les expériences réalisées sur des cellules en culture.

Des peptides optimisés

La recherche sur les peptides de pénétration cellulaire est aujourd'hui active. Près de 20 ans après la première description des peptides et avec un nombre croissant d'études cliniques à l'appui, les efforts commencent à porter leurs fruits. On comprend mieux les mécanismes d'absorption, et les études cliniques permettent d'optimiser les peptides pour une éventuelle utilisation thérapeutique.

En particulier, des absorptions très efficaces de peptides couplés à des nucléotides ont été obtenues, d'une part en modifiant de façon ciblée la séquence des acides aminés des peptides, d'autre part en greffant des groupes moléculaires supplémentaires sur leur séquence. C'est ainsi que l'équipe d'Ülo Langel, de l'Université de Stockholm, l'un des pionniers de la recherche sur les peptides de pénétration cellulaire, a amélioré considérablement l'importation de nucléotides en fixant des groupes de molécules de type chloroquine à de tels peptides. La chloroquine, un antipaludique, facilite la libération des molécules contenues dans les endosomes.

Malgré tous ces progrès, la route sera encore longue. La connaissance des mécanismes moléculaires de l'absorption des peptides de pénétration cellulaire reste insuffisante. Le développement de ces peptides s'effectue toujours par une succession d'essais, d'erreurs et d'ajustements, car le processus d'importation demeure trop complexe pour être directement exploitable dans les protocoles expérimentaux. La principale difficulté provient du fait que plusieurs facteurs doivent s'articuler correctement : la fixation à la membrane, l'absorption, la libération des molécules par les endosomes, ainsi que leur protection contre la dégradation. Enfin, pour une utilisation clinique, il s'agit de mettre en balance les coûts et les bénéfices thérapeutiques. Les peptides de pénétration cellulaire constituent avant tout une stratégie d'absorption pour les macromolécules. Or la production de ces macromolécules est souvent plus coûteuse que celle des substances actives usuelles, constituées de molécules plus petites.

Mais l'enjeu de ces peptides est plus vaste. En déchiffrant leurs mécanismes d'entrée dans les cellules, on comprendra mieux l'absorption des macromolécules en général. Des similitudes existent dans la façon dont ces peptides et certains virus accèdent à l'intérieur des cellules. Les peptides de pénétration cellulaire constitueraient donc un système modèle simplifié de choix pour comprendre des processus biologiques fondamentaux. ■

© Pour la Science - n° 429 - Juillet 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

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

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

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

Métaux étranges et théorie des cordes

Subir Sachdev

Certains états de la matière récemment identifiés ont pour origine des phénomènes quantiques que les théoriciens ont du mal à étudier avec les outils usuels. Un domaine inattendu vient à leur rescousse : la théorie des cordes.

CET AIMANT est mis en lévitation par un supraconducteur, dans lequel sa myriade d'électrons forme un vaste état quantique cohérent. Pour certains matériaux et certaines situations, il existe un lien mathématique entre l'état quantique des électrons et la description des trous noirs par la théorie des cordes.

© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013

L'ESSENTIEL

- Certains états particuliers de la matière, découverts récemment, sont dus au comportement quantique des électrons du matériau.
- Ces états de la matière émergent d'un tissu d'intrications entre les électrons, intrications dont la description théorique est difficile.
- Des outils de la théorie des cordes, mettant en œuvre des dimensions spatiales supplémentaires et une notion de dualité, permettent de traiter ces questions.

Il y a quelques années, je me suis rendu à une conférence sur la théorie des cordes. Je n'aurais jamais pensé me trouver dans un tel endroit. Je travaille aussi en physique, mais dans un tout autre domaine, celui de la matière condensée. Les théoriciens des cordes cherchent à décrire l'Univers à des énergies bien supérieures à tout ce qui se rencontre en laboratoire. En revanche, mes collègues et moi étudions des matériaux que nous refroidissons à des températures proches du zéro absolu. Les spécialistes des cordes explorent la physique qui gouverne les trous noirs et les dimensions supplémentaires que l'espace-temps comporterait. Nous nous intéressons aux semi-conducteurs, aux supraconducteurs et à toutes les formes et phases exotiques que présentent parfois les matériaux.

Au collège et au lycée, les élèves font connaissance de trois phases de la matière : solide, liquide et gaz. La distinction entre ces états est assez intuitive, mais ce n'est qu'au début du XX^{e} siècle qu'a émergé une compréhension complète de ces phases. Les atomes sont disposés de façon régulière et rigide dans les solides cristallins, alors qu'ils sont mobiles dans les liquides et les gaz. Ces trois phases ne sont que le début d'une longue liste d'états possibles. Un cristal solide, par exemple, n'est pas juste un réseau bien agencé d'atomes, il abrite aussi un essaim d'électrons dont le comportement influe sur les propriétés du solide et définit de nouvelles phases de la matière.

Une multitude d'électrons intriqués

Je me suis intéressé à un état de la matière très particulier que les spécialistes n'avaient pas même anticipé. Pour comprendre le phénomène qui s'y déroule, il faut mentionner un article écrit en 1935 par Albert Einstein, Boris Podolsky et Nathan Rosen. Ces physiciens attiraient l'attention sur le fait que la théorie quantique implique une connexion « fantomatique » entre des particules, un phénomène nommé intrication. Sans que l'on sache comment, les propriétés des particules intriquées se coordonnent instantanément, quelle que soit la distance qui les sépare. Einstein et ses coauteurs s'intéressaient au cas d'une paire d'électrons. Les métaux et les supraconducteurs mettent en jeu un très grand nombre d'électrons, de l'ordre de 10^{23} pour un échantillon typique. Et, dans certaines conditions, le phénomène d'intrication semble s'établir au sein de cette multitude d'électrons. L'étude de ces matériaux devient alors si complexe que les outils mathématiques que nous utilisions sont insuffisants. Comprendre ces matériaux est pourtant un enjeu important : ils ont des propriétés, de conductivité en particulier, intéressantes pour des applications.

Comment étudier les propriétés de ces matériaux ? C'est cette question qui m'a conduit à franchir le fossé culturel qui sépare le domaine de la matière condensée de la théorie des cordes. Les physiciens des cordes ont une réputation impressionnante : ils ont développé des outils mathématiques d'une grande puissance et d'une complexité extrême. Cette expertise pouvait-elle m'aider à expliquer les phénomènes observés dans ces matériaux ? Je l'espérais et je suis donc allé à une conférence sur ce sujet.

Mes collègues et moi nous sommes rendu compte que la théorie des cordes permettait d'aborder ces problèmes sous un angle totalement inattendu. En cherchant à unifier la théorie des particules élémentaires et la théorie de la gravitation d'Einstein, les théoriciens des cordes ont envisagé l'existence de davantage de dimensions d'espace que les trois que nous percevons au quotidien. Ces dimensions supplémentaires seraient enroulées sur elles-mêmes, imperceptibles à nos sens.

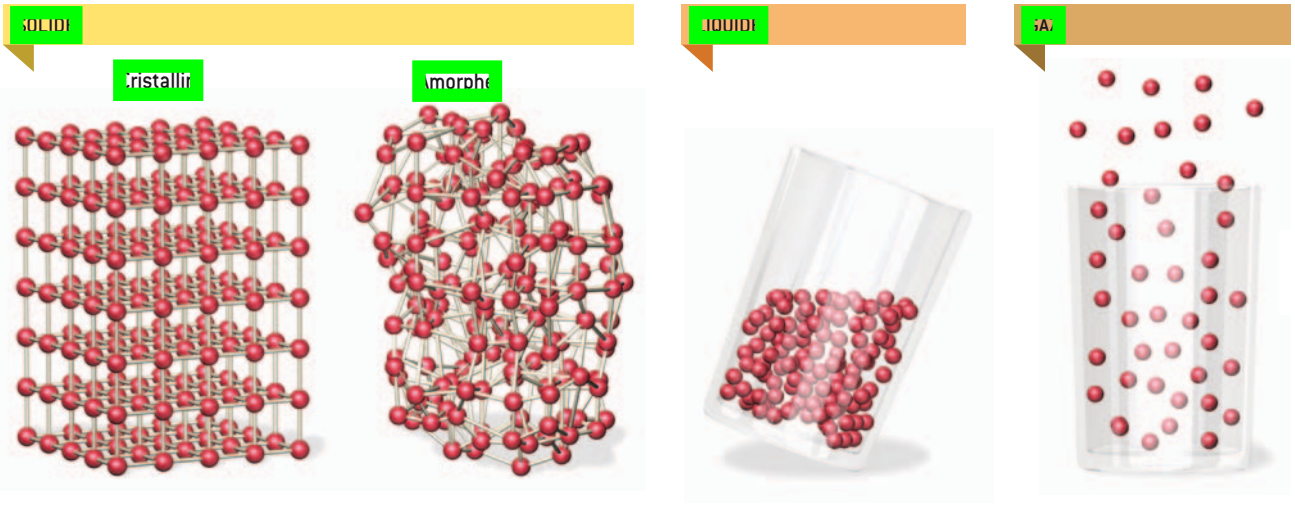
Ces chercheurs ont aussi découvert le principe de « dualité ». Cette notion permet de relier des théories des cordes qui semblent différentes. Un phénomène peut s'interpréter dans une théorie ou dans une autre, et un catalogue d'outils permet de traduire les aspects d'une théorie pour les interpréter dans l'autre. Par exemple, en 1997, Juan Maldacena, alors à l'Université Harvard, a mis en évidence une dualité entre des théories fonctionnant là où les effets quantiques sont faibles mais la gravité forte, et des théories utilisées quand les effets quantiques sont importants, mais la gravité faible.

En effet, les dualités et les dimensions supplémentaires nous ont permis de mieux comprendre la matière et l'intrication entre 10^{23} électrons. Mais avant de voir comment ces concepts nous ont aidés, commençons par décrire certaines phases que nous avions comprises grâce à la mécanique quantique.

Dans ces états de la matière, les éléments essentiels sont les électrons. Ceux-ci sont fournis par les atomes qui, par exemple, forment un réseau cristallin dans un solide.

La physique quantique confère aux atomes et aux électrons de la matière de nouvelles voies pour s'organiser. Les phases classiques (solide, liquide, gaz) correspondent à des arrangements différents des atomes et des molécules en fonction de la température. Les phases quantiques font intervenir des arrangements où les propriétés quantiques des particules, par exemple leur spin, jouent un rôle prédominant.

Phases classiques Les solides ont une taille et une forme fixes. Dans les solides cristallins, les molécules sont disposées selon un réseau régulier et rigide. Dans les solides amorphes, les positions des molécules sont désordonnées, comme dans un liquide, mais restent inchangées, sur de longues périodes. Les liquides ont un volume fixe, mais de forme variable. Les molécules sont mobiles, mais liées. Les gaz ont un volume et une forme variables. Leurs molécules sont mobiles et ne sont pas, ou peu, liées. Au-delà d'une certaine pression et d'une certaine température qui définissent le « point critique », il devient impossible de distinguer le gaz du liquide *(voir le diagramme de phase page ci-contre)*.

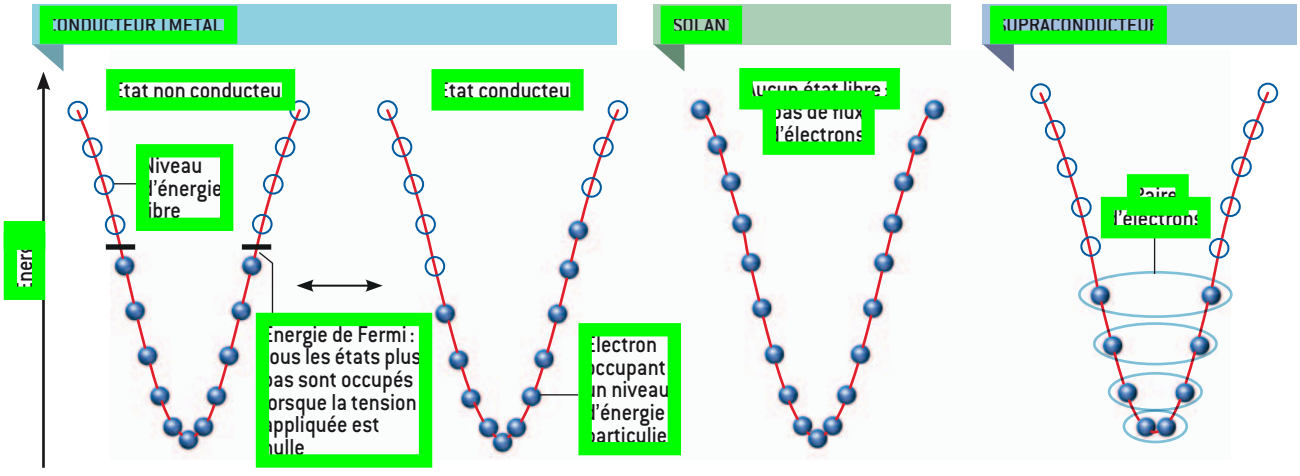


Phases quantiques Les métaux conduisent bien l'électricité, car leurs atomes offrent aux électrons suffisamment de sites d'états quantiques à occuper. Les électrons se déplacent comme s'ils constituaient un gaz.

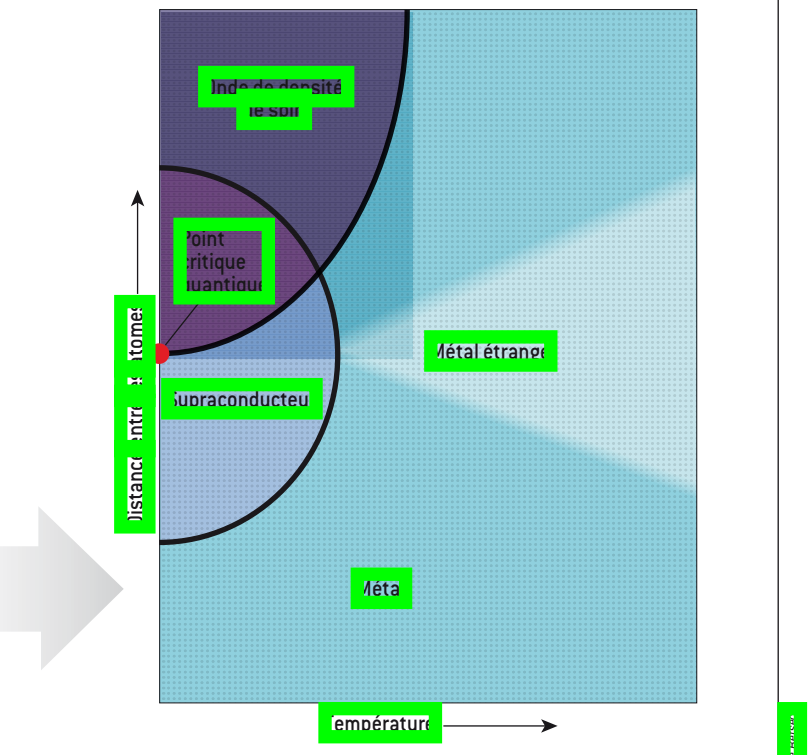
Les isolants ne conduisent pratiquement pas le courant. Les matériaux n'offrent pas aux électrons d'états libres ayant une énergie accessible. Les électrons restent piégés là où ils sont. Ils occupent tous les niveaux d'énergie disponibles.

Les supraconducteurs sont baignés d'un gaz de paires d'électrons. Les électrons s'apparient sous l'effet d'ondes de vibration (phonons) se propageant à travers le réseau d'atomes. Ces paires échappent aux restrictions quantiques qui s'appliquent aux électrons : elles peuvent se mettre dans un état quantique de la même énergie, ce qui leur permet de circuler sans résistance électrique.

Une onde de densité de spin (non représentée) est un matériau (parfois un isolant, parfois un supraconducteur) où les spins des électrons sont pour moitié dans l'état *haut* et pour moitié dans l'état *bas*. Dans certaines conditions, il se forme un métal étrange *(voir le diagramme de phase page ci-contre)*, où chaque électron a autant de chances d'être dans un état de spin *haut* que *bas*, sans qu'il y ait de motifs plus vastes. Dans un métal étrange, tous les électrons sont intriqués et ne se comportent ni comme des particules individuelles ni même comme des paires, mais comme d'immenses ensembles de particules.



© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013



Une partie des électrons errent dans tout le cristal et, quand nous relions le solide à une pile, un courant électrique s'établit. Dans à peu près tous les matériaux, le courant électrique suit la loi d'Ohm : son intensité est égale à la tension divisée par la résistance. Les isolants électriques tels que le téflon ont une résistance élevée ; les métaux conducteurs tels que le cuivre, une résistance faible. La résistance est associée à l'effet Joule, un phénomène de perte d'énergie par dissipation de chaleur. Les supraconducteurs ont une résistance quasi nulle, ce qui leur procure un grand intérêt et d'importantes applications industrielles. Ils ont été découverts en 1911 par le physicien néerlandais Heike Kamerlingh Onnes qui étudiait le mercure refroidi au-dessous de –269 °C. Aujourd'hui, nous connaissons des matériaux qui sont supraconducteurs aux températures (relativement) élevées de –138 °C.

Les conducteurs, les isolants et les supraconducteurs correspondent à diverses phases de la matière. Dans chaque cas, l'essaim électronique revêt une forme différente. Ces deux dernières décennies, les physiciens ont découvert encore d'autres phases électroniques dans les solides. Un exemple, pourtant très intéressant, n'a même pas de nom : par défaut, les physiciens le nomment « le métal étrange ». Il est caractérisé par une résistance électrique qui varie de façon inhabituelle avec la température par rapport aux métaux ordinaires.

Des ondes dans la matière

Les différences entre ces phases résultent du comportement collectif des électrons et de leurs propriétés. Si le mouvement des atomes dans les solides, les liquides et les gaz peut être décrit par la mécanique classique, le comportement des électrons est purement quantique. Les principes clefs qui régissent l'état des électrons d'un solide sont des versions à plus grande échelle de ceux que suivent les électrons au sein d'un atome. Un électron lié à un noyau est décrit comme une onde. Il est caractérisé par plusieurs propriétés, telles que son énergie et son spin – un moment cinétique quantique. Le spin confère un moment magnétique à l'électron, qui se comporte comme un petit aimant ; il existe dans deux états de base possibles notés « haut » et « bas ».

La principale règle gouvernant les électrons des atomes – et toutes les particules de matière nommées fermions – est le principe d'exclusion de Pauli : deux électrons ne peuvent pas occuper le même état quantique. Dans un atome, les électrons occupent d'abord les états disponibles de plus basse énergie, puis remplissent les niveaux supérieurs, comme un verre se remplit d'eau de bas en haut.

Dans un morceau de métal contenant 10^{23} électrons, le raisonnement est le même. Les électrons les moins liés à leur atome d'origine occupent des états qui s'étendent dans le cristal entier. On peut se

représenter ces états comme des ondes sinusoïdales, dont la longueur d'onde est reliée à l'énergie des électrons. Les électrons occupent les états de plus basse énergie possible compte tenu du principe d'exclusion. Ensemble, ils remplissent en général tous les états jusqu'à une énergie inférieure à un certain seuil, l'« énergie de Fermi » *(voir l'encadré pages 38 et 39)*.

L'application au métal d'une tension électrique confère à certains électrons suffisamment d'énergie pour passer d'un état occupé à un état vacant dont l'énergie est supérieure au niveau de Fermi. Ces électrons peuvent alors circuler librement. Dans un isolant, la densité des électrons est telle que tous les états accessibles sont déjà occupés, l'accès aux états libres nécessitant trop d'énergie ; même en appliquant une tension, un électron n'a nulle part où aller, et aucun courant ne circule.

Supraconducteurs : des paires d'électrons

Dans les supraconducteurs, les choses se compliquent. Les électrons ne peuvent pas être décrits de façon individuelle. Ils se lient par paires, comme le décrit la théorie de la supraconductivité développée en 1957 par les physiciens américains John Bardeen, Leon Cooper et John Robert Schrieffer (BCS). Au premier abord, ce système de couples peut sembler étrange : deux électrons devraient se repousser, car ils ont la même charge électrique. En fait, les vibrations du réseau cristallin créent indirectement une force attractive entre les électrons, qui l'emporte sur leur répulsion naturelle. Chaque paire se comporte non pas comme un fermion, mais comme un boson, type de particule quantique qui n'obéit pas au principe d'exclusion de Pauli. Les paires d'électrons peuvent toutes se condenser dans le même état avec l'énergie la plus faible possible, un phénomène nommé condensation de Bose-Einstein. Dans l'analogie du verre d'eau, cela reviendrait à verser de l'eau qui, au lieu de remplir le verre, va former au fond une mince couche capable d'absorber toute l'eau sans s'épaissir.

Si l'on applique une tension à un tel matériau, les électrons passent dans un état d'énergie supérieure, ce qui produit un courant : rien ne gêne la circulation des électrons appariés. Ainsi, un supraconducteur transmet un courant avec une résistance nulle.

Ces succès de la physique quantique pour expliquer le comportement des métaux, des isolants, des supraconducteurs et d'autres matériaux tels que les semiconducteurs (à l'origine de l'électronique moderne) ont conduit de nombreux physiciens du début des années 1980 à conclure qu'ils s'approchaient d'une compréhension complète des électrons dans les solides, et que toutes les découvertes majeures étaient derrière eux. Cette assurance a volé en éclats avec la découverte des supraconducteurs à haute température.

La théorie BCS n'explique pas comment ces matériaux deviennent supraconducteurs. Plus étonnant, il est possible d'observer une transition de phase à zéro kelvin, entre l'état supraconducteur et un état nommé « onde de densité de spin » *(voir l'encadré page 43)*. En se plaçant au point de transition de phase – en dopant le matériau ou en exerçant sur lui une pression pour changer la distance entre les atomes –, le point critique quantique, on peut obtenir un nouvel état si l'on augmente la température : le métal étrange.

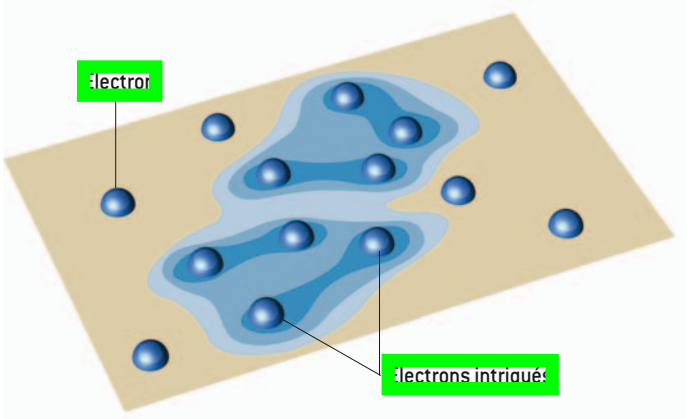
Le principe physique permettant de décrire le point critique quantique, les supraconducteurs et les métaux étranges associés est précisément la caractéristique de la mécanique quantique qui dérangeait tant Einstein, Podolsky et Rosen : l'intrication. Pour comprendre ce phénomène, considérons une paire d'électrons intriqués, dont les spins sont anticorrélés. Si un électron a un spin *haut*, l'autre a forcément un spin *bas*. Il n'est cependant pas possible de dire *a priori* quel électron est doté de quel spin.

A première vue, cela pourrait sembler banal. L'anticorrélation se rencontre souvent : si vous avez une paire de chaussures et que vous en mettez une près de la porte d'entrée et l'autre près de la porte de derrière, alors, quand vous trouvez une chaussure gauche

NOUS CRAIGNIONS QU'UNE THÉORIE des phases quantiques de la matière nous échappe à jamais... jusqu'à ce que nous prenions conscience des possibilités offertes par la théorie des cordes

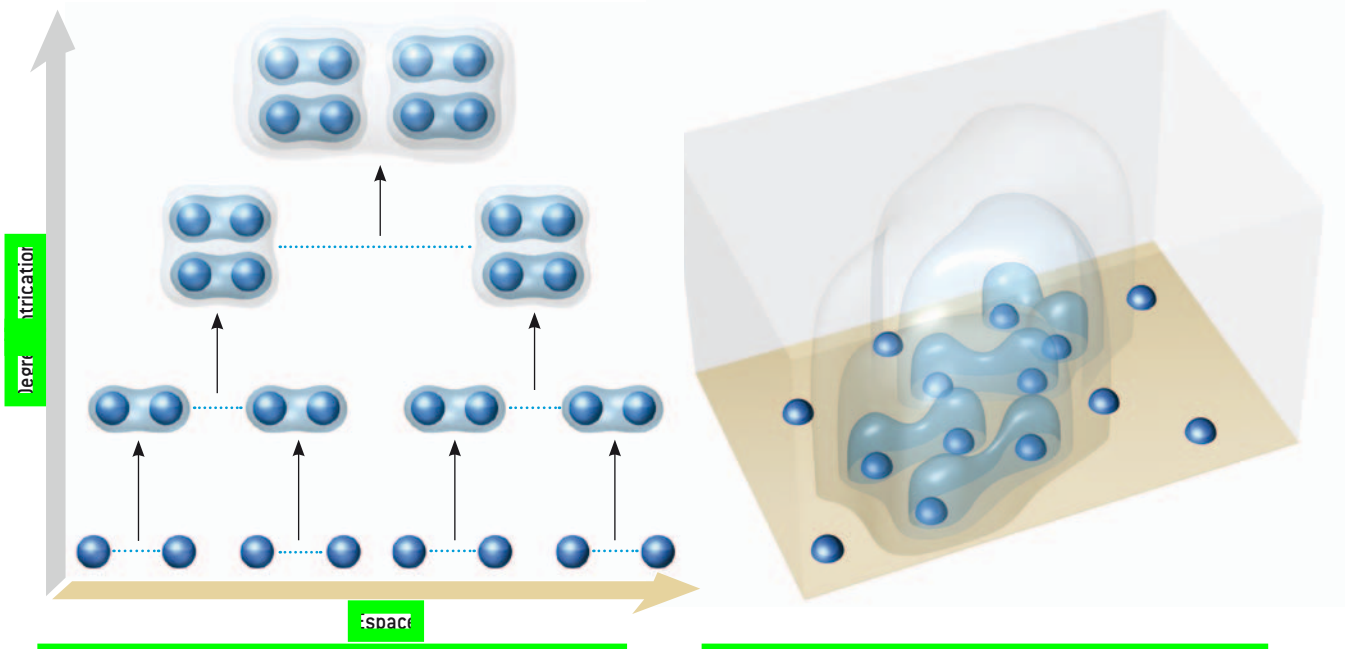
UN ÉCHEVEAU D'INTRICATION

Pour des raisons que les physiciens n'ont pas encore élucidées, les phases quantiques de la matière présentent, de façon implicite, une dimension spatiale qui se révèle au moment des transitions de phase ou dans certains états de la matière. Cette dimension se manifeste dans la description mathématique de cette relation particulière entre particules qu'est l'intrication.



Intrication des électrons
L'intrication signifie que plusieurs particules quantiques agissent de concert comme un tout indissociable. Les physiciens étudient plus souvent l'intrication de deux particules, voire de quelques-unes, mais dans les matériaux qui subissent une transition d'une phase quantique à une autre, un très grand nombre d'électrons sont intriqués.

© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013



Hiérarchie de l'intrication
Le processus d'intrication se comporte mathématiquement comme une distance spatiale. De la même façon qu'un déplacement dans l'espace suppose de passer par des points intermédiaires, l'intrication de myriades de particules commence par l'intrication de deux particules, qui se combinent à deux autres, et les quatre obtenues avec quatre autres, et ainsi de suite.

Dimension spatiale supplémentaire
Ainsi, le degré d'intrication joue le rôle d'une dimension spatiale implicite, en plus des trois dimensions spatiales où évoluent les électrons. En utilisant cette ressemblance mathématique, les théoriciens qui étudient les phases quantiques de la matière peuvent exploiter les méthodes et les outils de la théorie des cordes, où interviennent des dimensions spatiales supplémentaires.

un endroit, il n'y a pas de doute : l'autre est une chaussure droite. Mais la situation quantique présente une différence essentielle. Une chaussure est soit droite, soit gauche, même si vous n'avez pas vérifié de quel côté il s'agit ; en revanche, le spin de chaque électron n'est pas dans un état déterminé avant la mesure : il est en quelque sorte à la fois dans l'état *haut* et dans l'état *bas*. L'état n'est fixé que lors de la mesure.

L'intrication, phénomène non local

Le mystère est de savoir comment les électrons restent anticorrélés. Quand un électron « choisit » son spin, l'autre aussi. Comment font-ils pour choisir des sens opposés ? Il semble que l'information sur l'état quantique d'un électron soit instantanément connue de l'autre, quel que soit son éloignement. Dans un cadre classique, l'information ne peut transiter entre deux électrons à une vitesse supérieure à celle de la lumière dans le vide. Dans le cas de l'intrication quantique, le phénomène est dit non local et ne dépend pas de la distance entre les particules. En réalité, aucun des deux électrons n'a d'état quantique propre ; seule la paire en a un.

Intuitive ou non, la non-localité a été vérifiée expérimentalement à de nombreuses reprises. Einstein et ses coauteurs avaient clairement mis le doigt sur l'aspect le plus inattendu et le plus contraire à l'intuition de la mécanique quantique. Et depuis une dizaine d'années, les physiciens commencent à comprendre qu'elle est en jeu dans les propriétés bizarres des métaux étranges.

Près du point critique quantique, les électrons ne se comportent plus indépendamment ou même par paires, mais deviennent intriqués en masse. Le raisonnement que nous avons appliqué à deux électrons s'étend maintenant à 10^{23} particules. Deux électrons voisins sont intriqués l'un avec l'autre ; cette paire, à son tour, est intriquée avec les paires voisines, et ainsi de suite, créant un énorme réseau d'interconnexions *(voir l'encadré ci-dessus)*.

Ce phénomène se produit dans divers matériaux. Comment l'étudier ? Le réseau d'interconnexions est si complexe qu'une description directe est hors de portée. Mes collègues et moi craignions qu'une théorie des phases quantiques de la matière nous échappe à jamais… jusqu'à ce que nous prenions conscience des possibilités offertes par la théorie des cordes.

A priori, la théorie des cordes n'a rien à voir avec les états intriqués d'essaims électroniques. Elle concerne des cordes microscopiques qui vibrent comme des cordes de guitare miniatures, les différents modes de vibration correspondant aux différentes particules élémentaires. Ces cordes sont si petites que leur manifestation ne devient évidente qu'à des énergies extrêmement élevées, rencontrées dans les instants suivant le Big Bang ou à proximité des trous noirs.

Au milieu des années 1990, Joseph Polchinski, de l'Institut Kavli de physique théorique de Californie, à Santa Barbara, a remarqué que la théorie des cordes prévoit plus que des cordes. Elle implique l'existence de « branes » : des surfaces sur lesquelles les cordes se fixent. Ces branes représentent un domaine nouveau et très vaste de la physique, au-delà des particules de haute énergie pour lesquelles la théorie a été initialement conçue. Les cordes et les

branes ont aussi suggéré que l'Univers pouvait contenir plus de dimensions que les trois d'espace et celle de temps que nous expérimentons au quotidien.

Ainsi, ce qui ressemble pour nous à une particule (un simple point) pourrait en fait être l'extrémité d'une corde attachée à une brane et traversant des dimensions spatiales supplémentaires. Nous pouvons nous représenter l'Univers soit comme constitué de particules ponctuelles se déplaçant dans un espace-temps quadridimensionnel et en interactions complexes, soit comme constitué de cordes évoluant dans un espace-temps à cinq dimensions et dont les extrémités sont fixées sur des branes. Ces deux perspectives sont des descriptions équivalentes, ou duales, de la même situation. Elles sont même complémentaires. Suivant le problème considéré, les particules ponctuelles exigent un traitement complexe, tandis que les cordes peuvent offrir une solution simple. À l'inverse, quand les particules permettent de faire des calculs, le point de vue des cordes est peu gérable.

Pour mes travaux sur les métaux étranges, je n'ai pas besoin d'intégrer l'ensemble du cadre de la théorie des cordes, ni même de savoir si la théorie décrit correctement la physique des particules aux plus petites échelles. En revanche, le concept de dualité me permet de remplacer un problème mathématiquement insoluble par un autre beaucoup plus simple.

Jusqu'à il y a quelques années, je participais presque uniquement à des rencontres de physiciens de la matière condensée. Aujourd'hui, il m'arrive de boire mon café entouré de théoriciens des cordes, en essayant de comprendre leur description abstraite et originale des cordes et des branes. J'applique ensuite ces idées à des questions terre à terre soulevées par les nouveaux matériaux. Et je crois que ces échanges se font dans les deux sens : notre intuition et notre expérience concrète des phases quantiques des électrons aident les théoriciens des cordes à décrire les trous noirs et autres objets exotiques.

Quand les électrons des cristaux ont un degré limité d'intrication, on peut encore se les représenter comme des particules (soit des électrons simples, soit des paires). Mais quand beaucoup d'électrons deviennent fortement intriqués, on ne peut plus conserver l'image de particules, et la théorie classique peine à prévoir ce qui se passe. Dans notre nouvelle approche, nous décrivons ces systèmes en termes de cordes qui se propagent dans une dimension supplémentaire d'espace.

Mon collègue Brian Swingle, de l'Université Harvard, a établi une analogie entre la dimension spatiale supplémentaire et le réseau d'intrication quantique *(voir l'encadré pages 40 et 41)*. Les électrons forment des paires intriquées, puis ces paires s'intriquent deux par deux, et ainsi de suite. Le degré d'intrication peut être mathématiquement considéré comme une distance selon une dimension spatiale supplémentaire. Deux particules peuvent être éloignées dans l'espace ordinaire, mais leur proximité dans la dimension supplémentaire reflète leur intrication.

Une dimension d'espace supplémentaire

L'avantage pratique du principe de dualité est que les théoriciens des cordes ont mis au point tout un arsenal de solutions mathématiques pour des problèmes allant de la dynamique des particules dans la fournaise du Big Bang aux oscillations des champs quantiques au bord des trous noirs. Les spécialistes des phases quantiques de la matière peuvent y chercher une solution possible à un problème particulier et la transposer (grâce à la mathématique de la dualité) de la situation des cordes à celle de l'intrication.

En général, nous nous intéressons à l'état de plus basse énergie au zéro absolu, mais nous pouvons facilement décrire la matière à des températures non nulles à l'aide d'une technique qui pourrait sembler draconienne : notre problème d'électrons

Un « boson » de Higgs dans un supraconducteur

Les liens entre la physique des hautes énergies et celle de la matière condensée sont nombreux et variés, ce qui enrichit mutuellement ces deux domaines. Ils ne se limitent pas à l'utilisation des concepts mathématiques de la théorie des cordes pour décrire les métaux étranges. Un autre exemple est constitué par des liens entre le modèle standard de la physique des particules et la physique des supraconducteurs.

Les physiciens du LHC *(Large Hadron Collider)*, au CERN, ont annoncé récemment la découverte du boson de Higgs, clef de voûte du modèle standard de la physique des particules. Or, ce résultat intéresse beaucoup des physiciens de la matière qui étudient de près la détection et l'analyse de certains modes d'excitation dans la matière présentant des analogies avec le boson de Higgs.

L'une des premières évocations d'un tel mode d'excitation apparenté au boson de Higgs date de 1981. Peter Littlewood et Chandra Varma, deux théoriciens de la physique du solide aux Laboratoires Bell, aux États-Unis, ont interprété le mode d'excitation collectif des électrons qui apparaît dans l'état supraconducteur d'un cristal de séléniure de niobium de façon similaire à celui du boson de Higgs.

Les études sur ce mode d'excitation au sein du séléniure de niobium avaient débuté en 1980 avec les travaux de R. Sooryakumar et M. Klein, de l'Université de l'Illinois. Ils avaient observé ce mode d'excitation par spectroscopie Raman. En principe, ce mode est indétectable parce qu'il ne se couple pas directement à la lumière. Il était ici observable parce que la lumière d'un laser excitait une onde de déplacement des atomes du solide, qui elle-même faisait varier le nombre d'électrons disponibles pour la supraconductivité.

Le mode d'excitation dans le cas du séléniure de niobium est mathématiquement analogue à celui introduit en 1964 par Peter Higgs en physique des particules avec le boson de Higgs. Le théoricien de la physique des hautes énergies s'était d'ailleurs inspiré de travaux de physique de la matière condensée pour élaborer sa théorie.

Des chercheurs de notre laboratoire (équipe SQUAP) sont récemment allés plus loin et ont apporté de nouvelles preuves de la nature de ce mode d'excitation du séléniure de niobium. Ils ont mis en évidence qu'un tel mode de Higgs était absent dans un composé supraconducteur très similaire au séléniure de niobium, mais où le mode particulier de déplacement des atomes n'existe pas. Par ailleurs, en détruisant progressivement l'état supraconducteur en chauffant le cristal de séléniure de niobium de –271 °C à –265 °C), ils ont montré qu'alors que le mode de Higgs disparaît peu à peu, l'onde de déplacement des atomes gagne en intensité, tout cela en respectant une loi de conservation prédite par la théorie. Ces nouvelles preuves de l'existence d'un mode d'excitation analogue au boson de Higgs dans un supraconducteur continuent de stimuler les physiciens. Il s'agit, par exemple, d'arriver à détecter de telles excitations dans d'autres supraconducteurs ou dans d'autres systèmes quantiques.

Marie-Aude MEASSON
Laboratoire Matériaux et phénomènes quantiques, CNRS-Université Paris Diderot

© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013

ntriqués à une température non nulle équivaut à l'étude d'un trou noir dans le cadre de la théorie des cordes. Le fait que des trous noirs soient impliqués montre à quel point ces dualités sont extraordinaires. Personne ne suggère que les phases quantiques de la matière contiennent véritablement des trous noirs ; le lien est plus subtil. Stephen Hawking, de l'Université de Cambridge, est connu pour avoir montré (entre autres choses) qu'à un trou noir est associée une certaine température. Celle-ci se traduit, dans la logique de la dualité, par le fait que le système correspondant de matière condensée est chaud, de sorte que l'onde de densité de spin ou le supraconducteur se transforme en un métal étrange.

Dialogue entre un trou noir et un superfluide

Ces méthodes ont permis de mieux expliquer les métaux étranges et d'autres états de la matière, mais elles ont été surtout utiles pour élucider la transition d'un superfluide à un isolant de Mott – type de matériau qui devrait être conducteur, mais dont les électrons sont bloqués dans des puits de potentiel qui les empêchent de conduire le courant. Un superfluide est analogue à un supraconducteur, si ce n'est qu'il est constitué d'atomes électriquement neutres et délocalisés dans le matériau. Et ce n'est pas la résistance électrique qui devient nulle, mais la viscosité du fluide. Ces dernières années, les expérimentateurs ont développé de nouvelles méthodes pour créer des superfluides artificiels. Ils mettent en place un réseau de lasers qui s'entrecroisent en formant une onde stationnaire périodique et versent dans ce dispositif de grandes quantités d'atomes extrêmement froids. Cela crée des puits de potentiel qui piègent plus ou moins les atomes. Si le potentiel est peu profond, les atomes se comportent comme un superfluide : ils se déplacent librement et sans résistance d'un site du réseau à un autre. Quand les chercheurs augmentent l'intensité du laser, donc la profondeur du potentiel périodique, les effets de corrélation sont augmentés et le superfluide se transforme brutalement en un isolant de Mott.

Au point de transition entre l'état superfluide et l'état isolant, les atomes circulent d'une façon très particulière. Par exemple, quand on supprime la pression externe qui fait se déplacer les atomes, ceux-ci s'immobilisent à une allure qui dépend de la température et de la constante de Planck, le paramètre fondamental de la théorie quantique, lequel n'intervient pas dans le comportement des autres phases. Nous avons expliqué ce comportement en imaginant que le fluide critique quantique était l'équivalent par dualité d'un trou noir dans la théorie des cordes.

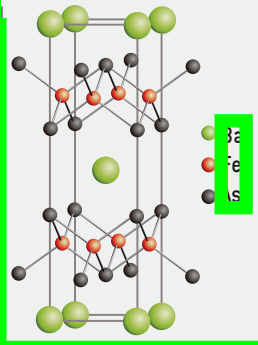
La dualité a pourtant un inconvénient. Par nature, elle transforme ce qui est complexe en quelque chose de simple. Mais nous ne voulons pas toujours transformer le problème : nous voulons aussi comprendre la complexité en elle-même. La dualité est une boîte noire mathématique qui nous cache les détails des états intriqués ou la façon dont ces états apparaissent dans les matériaux réels. L'explication des mécanismes en jeu en est encore à ses débuts. Pour ceux d'entre nous qui ont l'habitude de réfléchir à la dynamique des électrons dans les cristaux, la théorie des cordes a apporté une nouvelle perspective à la dynamique des états quantiques complexes faisant intervenir l'intrication. Pour les théoriciens des cordes, l'intérêt que nous portions à leur approche a piqué leur curiosité pour les phases des matériaux quantiques, des phénomènes bien éloignés de la physique des commencements de l'Univers ou de ce qui se passe dans les accélérateurs de particules. L'étrange confluence de ces courants de pensée met en lumière d'une façon inattendue l'unité de la nature. ■

Un exemple de métal étrange

À basse température, l'arséniure de baryum et de fer ($BaFe_2As_2$) change de propriétés en fonction de son dopage. Celui-ci consiste à remplacer une certaine fraction d'arsenic par du phosphore. Si le dopage est faible, le matériau forme un état qu'on nomme « onde de densité de spin ». Un électron du réseau cristallin se trouve entouré avec une plus grande probabilité d'électrons ayant un spin opposé. Dans cette phase, on observe une quasi-périodicité spatiale alternant des spins *haut* et *bas*.

Si la quantité de dopant augmente, la régularité de l'onde de densité de spin diminue. Elle disparaît pour la quantité critique de 30 pour cent d'arsenic remplacé par du phosphore. Le spin de chaque électron a alors autant de chance d'être *haut* que *bas* sur chaque site du réseau cristallin. L'onde de densité de spin n'existe plus, mais le matériau devient supraconducteur. Cependant, les physiciens pensent qu'il obéit à une théorie semblable à la théorie BCS, si ce n'est que la force attractive entre les paires d'électrons n'a pas pour origine les vibrations du réseau cristallin. Le mécanisme de formation des paires n'est pas encore compris.

La transition entre les phases est nommée point critique quantique. Si on maintient le dopage de 30 pour cent et que l'on augmente la température, une nouvelle phase apparaît, celle des métaux étranges dont la résistance électrique évolue différemment de celle des métaux ordinaires en fonction de la température. Un phénomène d'intrication massif entre ses électrons semble la décrire.



STRUCTURE de l'arséniure de baryum et de fer.

L'AUTEUR

Subir SACHDEV est professeur de physique à l'Université Harvard, aux États-Unis. Il est l'auteur de l'ouvrage *Quantum Phase Transitions* (Cambridge University Press, 2011).

BIBLIOGRAPHIE

S. Sachdev, **What can gauge-gravity duality teach us about condensed matter physics ?**, *Annual Review of Condensed Matter Physics*, vol. 3, pp. 9-33, 2012.

L. V. Johnson et P. Steinberg, **What black holes teach about strongly coupled particles**, Physics Today, vol. 63(5), pp. 29-33, 2010.

I. R. Klebanov et J. M. Maldacena, **Solving quantum field theories via curved spacetimes**, *Physics Today*, vol. 62(1), pp. 28-33, 2009.

Le tricotage permet de traduire des surfaces et des objets mathématiques abstraits en formes tangibles. Mais cela exige à la fois du temps et de la créativité.

Le tricot mathématique

Sarah-Marie Belcastro

© Shutterstock/ Kostsov

L'ESSENTIEL

- Les premiers tricots représentant des objets mathématiques datent d'il y a au moins un siècle.
- La représentation d'objets mathématiques par des tricots soulève des difficultés qui ne sont pas juste matérielles ou techniques, surtout si l'on cherche à être fidèle aux mathématiques.
- L'auteur a notamment tricoté des bandes de Möbius, des bouteilles de Klein, des nœuds ou des graphes intégrés à une surface torique.

© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013

Je sais tricoter depuis l'école primaire, mais je ne me souviens pas vraiment quand j'ai commencé pour la première fois à tricoter des objets mathématiques. Au plus tard, ce devait être durant ma première année de troisième cycle à l'université. J'ai beaucoup tricoté cette année-là, car je manquais de sommeil et il me fallait rester éveillée pendant les cours. Durant la session d'automne, j'ai fait un pull-over pour mon père, en terminant les dernières coutures juste après mon dernier examen, et au printemps suivant, je terminais un pull-over pour ma mère. C'est également au cours de ce printemps que j'ai tricoté, pendant le cours de topologie, une bouteille de Klein, une surface mathématique n'ayant ni extérieur ni intérieur, et qui ne peut donc pas servir de récipient *(voir la figure 1)*. J'ai achevé ce tricot pendant un exposé. Il était imparfait, mais j'étais si enthousiaste que, à la fin du cours, je l'ai lancé au professeur afin qu'il puisse y jeter un œil.

Au fil des ans, j'ai tricoté de nombreuses bouteilles de Klein ainsi que d'autres objets mathématiques, et j'ai sans cesse amélioré mes modèles. À l'époque où je me suis mise à tricoter des objets mathématiques, j'ignorais totalement si quelqu'un avait entrepris un tel travail auparavant. J'ai appris plus tard qu'il y a longtemps que des gens font du tricot mathématique.

Il y a un siècle déjà..

Les plus anciennes surfaces mathématiques tricotées connues ont été créées à la fin du XIX^{e} siècle ou au début du XX^{e} par Alexander Crum Brown, un professeur de chimie écossais *(voir l'encadré page 50)*. En 1971, Miles Reid, de l'Université de Warwick en Grande-Bretagne, a publié un article sur le tricotage de diverses surfaces. Au milieu des années 1990, une technique permettant de tricoter des bandes de Möbius, issue de l'article de M. Reid, a été reproduite et répandue *via* Internet, qui en était alors à ses débuts (une bande de Möbius est un ruban dont on joint les deux extrémités après avoir fait tourner de 180 degrés l'une de ces dernières, de telle façon que la surface résultante n'ait qu'un seul côté : on peut la parcourir en totalité sans lever le doigt).

1. QUAND ON TENTE de la représenter en trois dimensions, la bouteille de Klein, objet mathématiquement défini à partir d'un rectangle plan et qui n'a ni intérieur ni extérieur, devient une surface qui se recoupe avec elle-même. Ci-dessus, une bouteille de Klein tricotée par l'auteur en 2013. Au lieu d'une autointersection fixe, l'objet tricoté a un trou ; on peut ainsi le manipuler pour montrer ses propriétés. Les bandes colorées différemment correspondent à des bandes de Möbius.

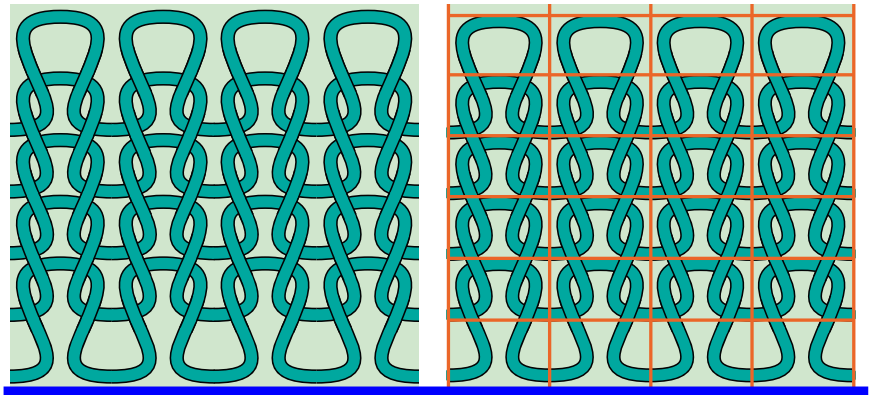
Des tricoteurs non mathématiciens ont également créé des modèles pour bandes de Möbius ; l'un d'eux, conçu pour être porté en tant qu'écharpe, a été créé en 1989 par Elizabeth Zimmerman, une célèbre tricoteuse d'origine britannique.

J'ai pris connaissance du modèle de M. Reid, et il m'inspira une nouvelle conception de la bouteille de Klein. Le tricotage mathématique a depuis rencontré du succès, et de nombreux nouveaux modèles sont maintenant disponibles. Certains d'entre eux figurent dans les deux ouvrages que j'ai coédités avec Carolyn Yackel, enseignante de mathématiques à l'Université Mercer, aux États-Unis.

Des ouvrages utiles à l'enseignement

On pourrait se demander quel peut être l'intérêt de tricoter des objets mathématiques. L'un des bénéfices de cette activité est que les tricots, une fois achevés, constituent une très bonne aide pour l'enseignement des mathématiques. Un tricot est souple et peut être manipulé physiquement, contrairement aux infographies, souvent magnifiques et scientifiquement parfaites, mais impalpables. Et l'activité de tricotage elle-même est éclairante : en créant un objet, sans suivre le modèle de quelqu'un d'autre, on en retire une connaissance approfondie. Pour concrétiser une abstraction, il faut la comprendre suffisamment pour décider quelles propriétés mettre en valeur. De telles décisions constituent une partie cruciale du processus de conception.

Considérons d'abord le tricotage d'un point de vue géométrique. Les mailles du tricot forment un réseau de rectangles, chaque rectangle contenant une maille *(voir la figure 2)*. On élabore la forme du tricot principalement à l'aide des « augmentations » et des « diminutions ». Comme leurs noms l'indiquent, les augmentations augmentent le nombre de mailles dans un rang *(voir la figure 3)*, et les diminutions le diminuent. Ces deux processus permettent de créer une courbure dans le tricot. On peut remarquer que faire une diminution a le même effet qu'une



2. LES RANGS DE MAILLES D'UN TRICOT dessinent un motif régulier *(à gauche)*. La périodicité du motif permet de superposer aux mailles un réseau rectangulaire, où chaque rectangle contient une maille *(à droite)*. Le réseau rectangulaire peut aussi être assimilé à un système de deux coordonnées cartésiennes.

augmentation sur le réseau de mailles : une diminution ressemble à une augmentation si l'on renverse le tricot.

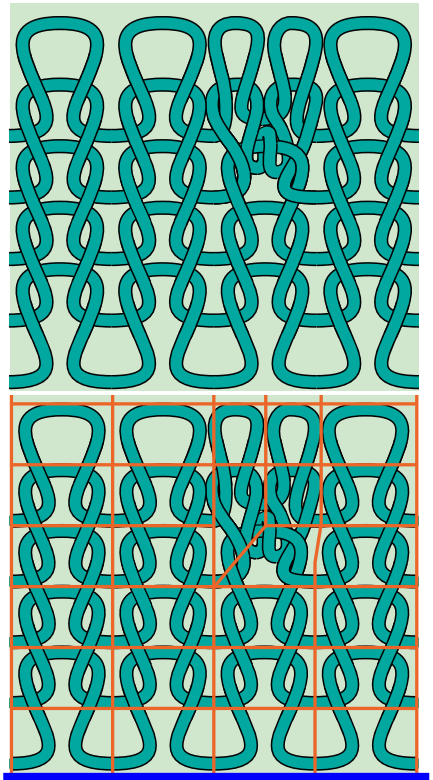
Les rangs et les colonnes de mailles guident l'œil le long de trajectoires tout au long de la surface. Ainsi, lorsqu'on observe une sphère tricotée d'un pôle à l'autre, les rangs et les colonnes de mailles correspondent aux lignes de latitude et de longitude *(voir la figure 4)*.

Tout tricotage revient à édifier une structure globale au moyen de choix opérés à l'échelle locale, au niveau des mailles. Un groupe de mailles ressemble à un système de coordonnées (un quadrillage dans un plan). Un tricot n'est cependant pas plan en général : un tel système de coordonnées ne s'applique que localement, pour le petit ensemble de mailles en question.

Les mailles, un système de coordonnées ?

Un objet muni d'un système de coordonnées ordinaires à l'échelle locale (c'est-à-dire qu'un tel système de coordonnées est attaché en chaque point et à sa proximité immédiate), mais peut-être pas à l'échelle globale, est ce que les mathématiciens nomment une variété. L'étude des différentes familles de variétés constitue d'ailleurs une partie importante des mathématiques actuelles.

La notion de variété sous-entend que le nombre de dimensions (le nombre de coordonnées indépendantes) est constant : à chaque point de la variété correspond un système de coordonnées qui peut être différent, mais de même dimensionnalité. Un pull-over représente ainsi une variété



3. POUR AJOUTER UNE MAILLE à un rang, on réalise une « augmentation » *(en haut)*, qui peut être représentée sur le réseau par deux rectangles naissant d'un seul rectangle *(en bas)*. L'augmentation crée une courbure dans le tricot. Une « diminution » a un effet similaire et ressemble à une augmentation lorsqu'on inverse le haut et le bas du tricot.

de dimension deux – à moins qu'il ait des poches cousues, car là où la poche est reliée au pull-over, trois coordonnées indépendantes (haut-bas, gauche-droite sur la poche et gauche-droite sous la poche) sont nécessaires pour repérer les points voisins de la couture.

La plupart des objets mathématiques tricotés correspondent à des variétés. En particulier, bien qu'une pièce de laine tricotée soit bien sûr tridimensionnelle, elle peut représenter des objets bidimensionnels, au même titre qu'une feuille de papier représente une surface bidimensionnelle. Autrement dit, un tricot peut être considéré comme un objet bidimensionnel – ou comme la frontière (la peau ou l'enveloppe) d'un objet tridimensionnel.

Certains objets mathématiques sont bidimensionnels, mais ne peuvent pas être représentés dans l'espace à trois dimensions sans qu'ils se traversent eux-mêmes ou sans l'ajout de trous (en termes mathématiques, ces objets peuvent être « immergés », mais pas « plongés » dans l'espace réel à trois dimensions). C'est le cas de la bouteille de Klein.

Des bouteilles de Klein en laine

Comme nous l'avons mentionné, la bouteille de Klein est une surface mathématique abstraite dépourvue de bords et formée de telle sorte que son intérieur ne se distingue pas de son extérieur *(voir la figure 5)*. En d'autres termes, on peut faire courir le doigt le long de la surface, en partant de tout point situé sur l'extérieur, et arriver au point correspondant à l'intérieur, sans lever le doigt.

Une représentation correcte de la bouteille de Klein consiste, à deux dimensions, à partir d'un rectangle dont deux côtés parallèles sont orientés (par des flèches) dans le même sens, tandis que les deux autres côtés sont munis d'orientations de sens opposés. La bouteille de Klein est l'objet bidimensionnel et abstrait obtenu quand on identifie (ou quand on fait se rejoindre) les côtés parallèles du rectangle, en respectant les orientations. Lorsqu'on cherche à figurer cela en trois dimensions, on obtient une surface qui semble se traverser elle-même, en présentant une autointersection ou un trou.

Ma première bouteille de Klein, du moins sa représentation en trois dimen-

© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013

sions, a été réalisée avec les aiguilles à tricoter parallèles aux flèches simples du rectangle, et les tours de tricotage formés dans la direction des flèches doubles *(voir la figure 5)*. Elle avait beaucoup d'imperfections, mais à l'époque, je n'en avais relevé qu'une seule : cette bouteille en laine était figée dans une configuration tridimensionnelle unique, parce que je l'avais réalisée avec une auto-intersection. Pour régler ce problème, j'ai rapidement réalisé une bouteille de Klein, assez vilaine, dotée d'un trou *(voir la figure 6)*.

Les défauts de mes premières bouteilles de Klein tricotées se rangeaient en deux catégories : esthétique et mathématique. D'abord l'esthétique : ces objets étaient affreux ! L'une des raisons était que j'utilisais du mauvais matériel. J'ai toujours préféré me servir d'aiguilles à tricoter circulaires, qui sont composées de deux extrémités pointues reliées par un câble fin et souple. À l'université, j'utilisais souvent des aiguilles dont je raccourcissais les câbles en plastique en les faisant fondre, ou je fabriquais mes propres aiguilles circulaires avec du fil métallique et du ruban d'emballage (qui accrochait sans arrêt le fil à tricoter).

Ces tentatives pour fabriquer des aiguilles à la fois suffisamment courtes et suffisamment flexibles pour mes besoins ont donné lieu à une expérience de tricotage plutôt frustrante et à des résultats pas très heureux. Par la suite, j'ai pu me procurer des aiguilles en bambou fixées à des câbles creux que l'on peut allonger ou raccourcir à volonté. Et j'ai appris comment utiliser tout l'attirail standard du tricotage pour obtenir les résultats que je désire.

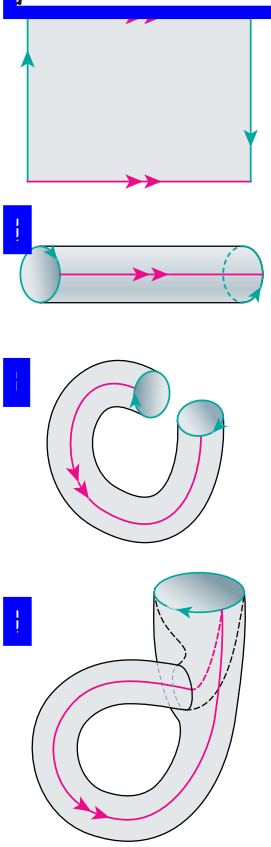
Difficultés matérielles et mathématiques

Cependant, il n'y avait pas que les aiguilles : le fil à tricoter posait lui aussi problème. Ma première bouteille de Klein a été fabriquée avec un fil d'acrylique acceptable, mais de qualité médiocre. La deuxième a été fabriquée avec un fil d'origine inconnue, que j'avais trouvé dans une brocante. Il était difficile à travailler et son toucher « plastique-fibre de verre » m'horripilait. Aujourd'hui, j'ai tendance à utiliser du fil de haute qualité plutôt que le tout-venant, et je choisis la couleur, le type de teinture et la texture du fil en fonction de mes objectifs mathématiques. En fin de compte, dans la conception de ces objets, j'ai improvisé sans trop penser aux détails, de sorte que ma première bouteille de Klein est difforme et que la deuxième présente une ligne verticale bizarre *(non visible sur la figure 6)*.

Venons-en maintenant aux problèmes mathématiques. L'approche que j'ai utilisée dans les deux cas consistait à tricoter quelque chose ressemblant à un cylindre, à faire passer l'une des extrémités de ce cylindre à travers son côté, puis à joindre les deux extrémités du cylindre. Pour passer à travers le cylindre, on peut intégrer une ouverture latérale (comme je l'ai fait avec ma deuxième bouteille de Klein), ou créer une auto-intersection en faisant passer des mailles à travers le côté du cylindre (comme je l'ai fait avec ma première bouteille de Klein).

De l'une ou l'autre manière, en utilisant cette méthode, on crée une bouteille de Klein à partir du rectangle aux côtés orientés et identifiés, les rangs de mailles étant parallèles à deux des côtés du rectangle

4. LES RANGS ET LES COLONNES de mailles guident l'œil le long de trajectoires qui équivalent à des lignes de latitude et de longitude, un système de coordonnées adapté à la courbure de la sphère.



5. UNE BOUTEILLE DE KLEIN est l'objet mathématique obtenu à partir d'un rectangle aux côtés orientés *(a, flèches)*, que l'on identifie (ou que l'on joint) deux à deux. Un modèle tridimensionnel de la bouteille de Klein s'obtient en courbant et en étirant le rectangle dans la troisième dimension, de façon à coller les côtés qui se correspondent *(b, c)*. Mais la surface formée doit alors se traverser *(d)*. L'ouvrage ci-dessus est la première bouteille de Klein tricotée par l'auteur (cette surface comporte ici une auto-intersection tricotée).

6. LA DEUXIEME BOUTEILLE DE KLEIN tricotée par l'auteur. Elle comporte une ouverture et non une auto-intersection tricotée, de sorte que la surface coulisse au sein d'elle-même. Bien que ce modèle ait constitué une amélioration par rapport au premier, les coordonnées suggérées par les rangs et les colonnes de mailles ne correspondent toujours pas au système de coordonnées associé au rectangle permettant de définir mathématiquement la bouteille de Klein.

7. CETTE BOUTEILLE DE KLEIN d'une dizaine de centimètres a été réalisée en utilisant la méthode de tricotage d'une bande de Möbius proposée par Miles Reid. Une torsion d'un demi-tour est d'emblée intégrée au tricot, de sorte que l'identification souhaitée des côtés du rectangle de définition de la bouteille de Klein se produit automatiquement, avec des coordonnées qui correspondent à celles suggérées par les rangs et les colonnes de mailles.

les flèches simples dans la figure 5) et les colonnes de mailles étant parallèles aux deux autres côtés du rectangle *(les flèches doubles dans la figure 5)*.

Il est très facile de joindre les extrémités du cylindre de façon incorrecte. À moins que le tricoteur ou la tricoteuse n'introduise une torsion d'un demi-tour avant de réunir les deux extrémités, les quatre coins du rectangle ne se rejoindront pas. Sans cette torsion, le résultat est encore une bouteille de Klein, mais les coordonnées suggérées par les rangs et les colonnes de mailles ne correspondent pas aux coordonnées du rectangle sous-jacent, et la géométrie de l'objet achevé n'est pas celle souhaitée. Un cylindre tricoté, cependant, oppose de la résistance à la torsion, d'où la difficulté que présente cette étape.

Donner au tricot une torsion intrinsèque

J'ai fini par trouver une solution à ce problème : créer le demi-tour de torsion intrinsèquement au lieu de l'ajouter à la fin. J'ai effectué cela en partant de la construction de la bande de Möbius indiquée par M. Reid. Dans cette méthode, les aiguilles sont parallèles aux flèches doubles du rectangle de base, et le tricotage se déroule en suivant simultanément les deux côtés à flèches simples du rectangle. Comme le demi-tour de torsion est ainsi d'emblée présent dans le tricot, la jointure souhaitée du rectangle sous-jacent se produit automatiquement,

L'AUTEUR

Sarah-Marie BELCASTRO est mathématicienne au *Smith College*, à Northampton (Massachusetts, États-Unis), et membre invitée du *Sarah Lawrence College*, État de New York).

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

8. CETTE BANDE DE MÖBIUS intègre un motif représentant le graphe complet K_6 (six sommets tous connectés deux à deux par une arête). Le fil étant grossier, les arêtes ne se distinguent pas bien, les mailles adjacentes entrelaçant les couleurs.

avec des coordonnées (abscisses et ordonnées) qui correspondent bien aux rangs et aux colonnes de mailles *(voir la figure 7)*. Des instructions sommaires pour tricoter une bouteille de Klein sont disponibles sur mon site Web de tricotage mathématique.

Cette solution était le fruit de plusieurs années de réflexion. Après m'être rendu compte à quel point mes premières bouteilles de Klein étaient défectueuses, je souhaitais faire mieux et créer un modèle qui fût plus fidèle aux mathématiques. Et c'est ainsi que la question s'est posée : que signifie être mathématiquement fidèle pour un objet tricoté ?

Être fidèle aux mathématiques

La façon dont un objet est construit, dans tout art ou technique, met en lumière certaines des propriétés de cet objet et en masque d'autres. La modélisation d'objets mathématiques ne fait pas exception à cette règle : elle nécessite que nous fassions des choix sur les aspects mathématiques de cet objet qui nous semblent les plus importants. Chaque fois que possible, je tricote des objets de telle façon qu'un ensemble particulier de propriétés soit intrinsèque à la construction.

La plupart des objets que je confectionne présentent à la fois des aspects topologiques et des aspects géométriques. Autrement dit, ces objets ont une forme globale qui est conservée lorsqu'on les courbe ou qu'on les étire, et ils ont une configuration et

© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013

une structure particulières dans l'espace. Parfois, la topologie prend le pas sur la géométrie, parfois c'est l'inverse ; cette différence détermine si l'objet doit être muni d'une courbure, et si oui, où.

Je tricote souvent des surfaces. Elles sont bidimensionnelles et généralement lisses, ce qui signifie que les modèles tricotés ne doivent pas comporter de coutures, visibles ou non. Un modèle idéal d'une surface ne devrait pas comporter de mailles d'arrêt pour les bords. Dans le monde réel, le fil doit avoir deux extrémités. De même, une pièce tricotée peut être fabriquée à partir de plus d'une pièce de fil à tricoter, mais la transition d'une pelote à une autre devrait être invisible. Ces caractéristiques font partie d'un modèle topologique pour le tricotage que j'ai décrit en 2009.

Textures et motifs

Un autre aspect à considérer quand on tricote des objets mathématiques est la texture de leur surface. Par exemple, l'intérieur et l'extérieur d'une bouteille de Klein abstraite se confondent, et donc la texture d'une bouteille de Klein tricotée devrait être la même sur ses deux côtés (ou faces) physiques. Il devrait être impossible de dire quelle face réelle on est en train d'observer ou toucher, et aucune transition ne devrait être perceptible entre les différentes parties de la pièce tricotée. Pour certains autres objets, les deux faces sont mathématiquement distinctes, et leurs textures devraient par conséquent être distinguables.

On peut aussi mettre en exergue certains sous-objets ou propriétés mathématiques au moyen d'un motif intégré au tricot. Par exemple, on peut se servir de motifs à rayures pour faire apparaître des bandes de Möbius au sein d'une bouteille de Klein.

La plupart de ces modèles à motifs posent des difficultés mathématiques en raison du problème de la discrétisation : une courbe régulière ou une aire colorée dessinées sur un morceau de papier ou électroniquement doivent, dans le tricot, être traduites en une séquence de mailles discrètes. Cela nous ramène à la question du maillage *(voir les figures 3 et 4)*. Les informaticiens qui travaillent sur la visualisation d'objets en trois dimensions ont mis au point des algorithmes pour imposer un maillage sur un objet idéalisé. Un maillage plus fin donne un aspect plus lisse ; de fait, c'est grâce à l'utilisation de maillages très fins que l'on obtient des infographies très réalistes. Dans le tricotage, l'obtention d'un maillage plus fin nécessite à la fois un fil plus fin et beaucoup plus de temps.

La discrétisation d'un motif n'est pas aussi simple que la surimposition d'un maillage. En effet, les mailles d'un tricot ne sont pas tout à fait carrées en proportion ; leur « rapport d'aspect », c'est-à-dire le rapport largeur/hauteur, est proche de 5:6. Ce fait doit être pris en considération avant de passer à l'exécution du tricot ; sinon, l'objet obtenu sera incorrectement allongé. En général, je réalise un échantillon de tricot avec le fil que j'ai l'intention d'utiliser, ce qui me permet de voir quel sera le rapport d'aspect de la maille, puis je crée un papier quadrillé constitué de rectangles élémentaires ayant les proportions appropriées. Il faut ensuite déterminer la forme globale – là où il y aura des augmentations et des diminutions, des rangs raccourcis et d'autres éléments de construction – et traduire cela sur le papier quadrillé. Le défi consiste alors à placer avec précision des motifs ou des couleurs sur cette forme. Voici quelques exemples.

Tout d'abord, considérons le tore. Un tore est une surface de révolution ayant la forme d'une chambre à air ou d'une bouée – il est engendré en faisant tourner un cercle autour d'un axe extérieur au cercle et situé

9. UN TORE COMPORTANT UN MOTIF correspondant au graphe complet K_7 (sept sommets tous reliés deux à deux par une arête) tracé sur le tore. La conception d'un tel modèle tricoté, où plusieurs segments de droite doivent être représentés sur une surface courbe, n'est pas facile.

10. CES TORES TRICOTÉS EN DEUX COULEURS représentent des nœuds de trèfle *(en médaillons)* tracés sur une surface torique. Sur le tore, le nœud de trèfle correspond à une courbe fermée qui ne se recoupe pas. Il existe en deux chiralités : chaque nœud est une image miroir de l'autre, ici en structure comme en couleur.

1. CETTE BANDE DE MOBIUS, tricotée avec un fil de laine et soie, est destinée à être portée comme une écharpe. Le motif tricoté représente le graphe complet K_6.

dans son plan. Un nœud torique est une courbe fermée et sans croisements que l'on peut tracer sur le tore, de telle façon que lorsqu'on efface la surface torique, la courbe qui subsiste forme un nœud *(voir la figure 10)*. Sur le « tore plat », le rectangle analogue à celui qui sert à définir la bouteille de Klein, mais dont les côtés opposés sont simplement identifiés ou recollés, un nœud torique peut être représenté par une courbe rectiligne, c'est-à-dire une droite de pente constante. Pour traduire cela sur un tricot, il faut modifier la pente de la courbe d'une façon qui soit cohérente avec la courbure de la surface torique. Heureusement, il existe une construction permettant d'obtenir un tore tricoté en n'opérant qu'un petit nombre de modifications.

Comment tricoter des droites sur un tore ?

Un défi supplémentaire est de tricoter une ligne ou une courbe dans un objet dont la surface a une texture bosselée. Chaque maille doit être tricotée dans une seule couleur de fil (car une maille représente la taille minimale du maillage). Or avec des mailles adjacentes de couleurs différentes, les couleurs s'entrelacent. Par conséquent, pour représenter une courbe bien nette, la largeur de cette dernière doit être d'au moins deux mailles *(voir les figures 8 et 11, où les maillages n'ont pas la même finesse)*.

Tricoter plusieurs segments de droite sur une surface courbe est également très difficile. Dans un autre projet, j'ai tricoté le graphe complet K_7, c'est-à-dire un ensemble de sept sommets tous reliés deux à deux par une arête, dans un tore *(voir la figure 9)*. Cela a nécessité l'utilisation d'une symétrie d'ordre 7 (symétrie par rotation d'un septième de tour). Pour distinguer les différents segments de droite issus d'un sommet, chacun de ces segments devait avoir une pente différente, et ces pentes devaient être modifiées en conformité avec la construction du tore. Qui plus est, les sommets tricotés avaient une certaine épaisseur, ce qui perturbait les calculs des pentes.

Qu'implique exactement le processus de conception d'un modèle pour un objet mathématique ? Voici comment je procède. Après avoir choisi un objet à modéliser, je mets au clair mes objectifs mathématiques

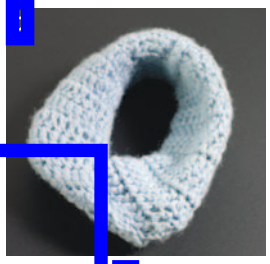
LES PREMIERS TRAVAUX D'AIGUILLES MATHEMATIQUES : ALEXANDER CRUM BROWN

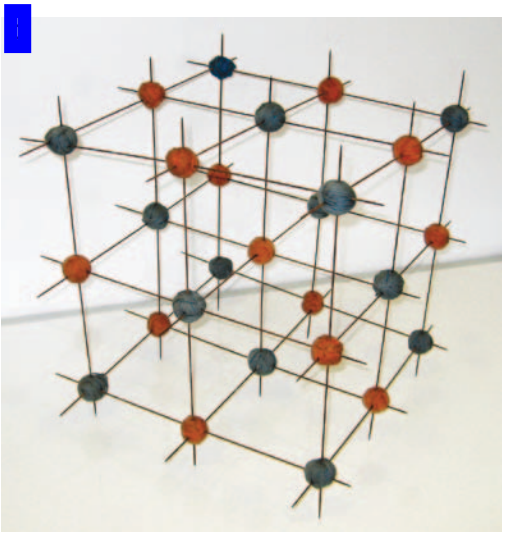
Pour ceux qui ont un penchant à la fois pour les mathématiques et les travaux d'aiguilles, la bouteille de Klein est depuis longtemps un sujet d'étude. En témoigne la bouteille de Klein ci-contre *(a)*, réalisée par le chimiste écossais Alexander Crum Brown (1838-1922) dans les années 1890-1910.

Crum Brown était professeur de chimie à l'Université d'Édimbourg et membre de la *Royal Society* d'Édimbourg. Enfant, il aimait fabriquer des modèles et il inventa une machine à tisser. Il continua à s'intéresser à la fabrication de modèles à l'âge adulte ; sa thèse pour son diplôme de médecine à l'Université d'Édimbourg détaillait un système graphique permettant de représenter la structure des composés organiques, les atomes étant représentés par des cercles et les liaisons par des lignes. Les activités manuelles de Crum Brown l'ont sans doute aidé pour ses travaux plus abstraits. La figure *(c)* montre un modèle qu'il a fabriqué en 1883, et qui représente la structure cristalline du chlorure de sodium (NaCl). Les atomes sont représentés par des boules de laine rouges et bleues, et les liaisons par des aiguilles métalliques.

Les travaux d'aiguilles ne constituaient que l'une des nombreuses activités de Crum Brown. Il était également fasciné par les voyelles, et il a fabriqué une « bouteille parlante » qui produisait des sons de voyelles quand on soufflait dedans. En plus de la bouteille de Klein, il a fabriqué une grande variété d'objets en tricot, et a pour certains utilisé plusieurs couleurs afin de montrer les intersections des surfaces. L'objet *(b)* a ainsi été tricoté en trois couleurs, avec des couches entrelacées.

Tous ces travaux se sont révélés utiles pour les vieux jours de Crum Brown. James Walker, qui lui succéda à la chaire de chimie à l'Université d'Édimbourg, écrivit dans une nécrologie consacrée à Crum Brown que celui-ci avait passé dans l'invalidité les sept dernières années de sa vie, mais il fit remarquer : « Son esprit perdit très peu de son activité. Il lisait beaucoup et s'amusait avec des méthodes originales de tricotage. »





© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013

12. LE TRICOT CI-DESSUS EST INSPIRÉ d'un diagramme figurant dans le manuel de topologie algébrique d'Allen Hatcher. La structure est celle d'une tige dont la section est un Y aux bras de même longueur, la tige étant recourbée pour joindre l'une de ses deux extrémités à l'autre, après une torsion d'un tiers de tour. La surface ainsi obtenue ne comporte qu'un seul bord continu. L'ouvrage est ici renforcé avec du fil de fer pour mieux montrer sa structure. Le tricot de droite est mathématiquement identique, mais il est dépourvu d'armature métallique et est dimensionné pour être porté comme un capuchon.

en pratique, je le fais souvent inconsciemment). Les objectifs choisis imposent des contraintes sur le tricotage. Cela me donne un cadre pour concevoir le tricotage de l'objet dans sa structure globale.

Je dois ensuite considérer la structure fine de cet objet. Y a-t-il des aspects particuliers des mathématiques que l'on peut mettre en valeur avec de la couleur ou un motif ? Des textures particulières sont-elles nécessaires ? Pendant la résolution du problème de discrétisation qui s'ensuit, je produis habituellement un modèle que je peux suivre – j'ai mauvaise mémoire et sans cela je perdrais tout mon travail.

Se coiffer d'une bande de Möbius généralisée

Une création mathématique récente peut illustrer cela. Un jour, un dessin figurant dans le livre *Algebraic Topology* de Allen Hatcher (en accès libre sur Internet) attira mon regard ; il me semblait que si la surface représentée était tricotée, le résultat serait formidable. Sa structure est celle d'une tige dont la section est un Y ayant ses trois bras de même longueur, la tige étant recourbée sur elle-même de façon à ce que ses deux extrémités se rejoignent, mais après une torsion de la tige d'un tiers de tour. On obtient ainsi une sorte de bande circulaire qui n'a qu'un seul bord continu (le doigt peut continûment parcourir le bord dans sa totalité et revenir au point de départ).

Bien que cette surface ne constitue pas une variété (il n'est pas possible d'associer un système de coordonnées univoque aux points de l'axe central de la tige), elle ressemble à une bande de Möbius – c'en est une généralisation. J'ai donc pensé que je pouvais utiliser une construction similaire à celle d'une bande de Möbius – à condition de trouver une façon de tricoter vers l'extérieur, à partir du cercle central (l'axe circulaire de la tige en Y).

Je souhaitais que l'objet tricoté soit fait à partir d'une pelote unique de fil, l'objet mathématique n'ayant qu'un seul bord. Je devais ainsi trouver une façon d'utiliser un seul fil pour produire trois ensembles entrelacés de mailles libres (un tricot ordinaire n'a que deux ensembles de mailles, supérieur et inférieur, par fil). Après avoir résolu ce problème – et cela m'a pris du temps –, je décidai d'utiliser une texture qui aurait le même aspect à partir de tous les points de vue, de sorte que le cercle central serait moins visible. Pour ma première tentative, j'ai décidé de faire simple et je n'ai pas ajouté davantage de conditions *(voir la figure 12)*.

Après avoir terminé ma première réalisation, je l'ai examinée et me suis rendu compte qu'elle ressemblait à un capuchon. J'ai redimensionné la version suivante afin de produire un véritable vêtement. Un objet mathématique que l'on peut porter est un résultat pratique rare, et bienvenu !

Bien que j'aie travaillé sur différents projets de tricot mathématique, je n'en ai pas encore fini avec mes modèles de bouteille de Klein – et cela fait environ 20 ans que j'ai commencé. On m'a demandé d'adapter ma construction pour en faire un chapeau qui puisse être porté. C'est l'un des nombreux défis de tricot mathématique que je compte bien relever. ■

SUR LE WEB

The Home of Mathematical Knitting (site Web de l'auteur) : www.toroidalsnark.net/mathknit.html

BIBLIOGRAPHIE

C.-M. Belcastro et C. Yackel (éds.), **Crafting by Concepts : Fiber Arts and Mathematics**, AK Peters, 2011.

C.-M. Belcastro, **Every topological surface can be knit : A proof**, *Journal of Mathematics and the Arts*, vol. 3(2), pp. 67-83, 2009.

C.-M. Belcastro et C. Yackel (éds.), **Making Mathematics with Needlework : Ten Papers and Ten Projects**, AK Peters, 2007.

M. O. Reid, **The knitting of surfaces**, *Eureka - The Journal of the Archimedeans*, vol. 34, pp. 21-26, 1971.

Des VOLS SPATIAUX pour tous ?

Alan Stern

L'espace de demain ne sera pas réservé uniquement aux touristes fortunés. Pour les chercheurs, l'industrie spatiale commerciale naissante ouvre des possibilités nouvelles, moins chères et variées.

L'un des problèmes les plus frustrants de la recherche spatiale est le mode d'accès à l'espace, qui n'a pas changé depuis 50 ans. Aller dans l'espace reste à la fois cher et rare. Nous sommes encore loin du stade où les scientifiques iront régulièrement en orbite pour utiliser eux-mêmes leurs instruments de mesures. D'ailleurs, certaines régions de la haute atmosphère ne sont aujourd'hui accessibles que par des systèmes automatisés.

Tout cela devrait bientôt changer. L'avènement de vols spatiaux commerciaux réguliers à but lucratif (récemment illustré par les lancements réussis du vaisseau cargo spatial *Dragon*, construit et exploité par *SpaceX*, vers la Station spatiale internationale, l'ISS) transformera probablement la recherche spatiale. Les scientifiques bénéficieront de coûts de lancement réduits, d'un accès plus fréquent à l'espace et de la possibilité de réaliser eux-mêmes leurs expériences en orbite. Ces avancées rendront certainement service aux grandes missions de recherche de la NASA et des agences spatiales japonaise et européenne. Et elles rendront l'espace plus abordable pour de nombreux pays, institutions académiques et entreprises.

J'ai commencé à m'intéresser au potentiel des vols spatiaux commerciaux lorsque j'étais administrateur adjoint de la NASA, en charge de toutes les études scientifiques spatiales et terrestres. Depuis, j'ai été conseiller pour des sociétés spatiales commerciales, directeur scientifique de deux équipes participant au *Google Lunar* X PRIZE (qui récompensera d'une bourse de plus de 30 millions de dollars la première mission robotisée qui se posera sur la Lune et renverra une vidéo vers la Terre) et me suis occupé d'achats de vols habités commerciaux pour la recherche à travers mon institution. Autrement dit, j'ai vu grandir de mes propres yeux la promesse des vols spatiaux commerciaux.

Dans les années à venir, toute une panoplie de systèmes spatiaux commerciaux entrera en service et offrira un éventail de possibilités très intéressantes pour les chercheurs. C'est une nouvelle étape pour les sciences spatiales, qui ont débuté au

L'ESSENTIEL

- Le coût et la rareté des vols vers l'espace ont été des obstacles au développement de la recherche spatiale.
- Des sociétés privées annoncent une ère de vols spatiaux moins chers et plus fréquents.
- Bien que la plupart de ces entreprises aient pour objectif premier d'envoyer des touristes dans l'espace, les chercheurs pourront y trouver une place pour eux et leurs expériences.
- Ces sociétés espèrent, à terme, atteindre la Lune ou Mars...

© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013

endemain de la Seconde Guerre mondiale avec la conversion en plates-formes de recherche des fusées V2 capturées à l'armée allemande. Depuis, les scientifiques ont toujours fait preuve d'inventivité pour faire avancer leurs travaux et envoyer leurs détecteurs dans l'espace. Les projets actuellement en développement s'inscrivent dans cette démarche des pionniers de l'espace. Si certains échouent, d'autres seront couronnés de succès. Dans le contexte actuel de restrictions budgétaires, de dépassements de coûts et de stagnation prolongée de l'accès à l'espace, ces succès ne seront jamais assez rapides à venir.

On peut raisonnablement parier qu'en matière d'exploration spatiale, les décennies 2010 et 2020 représenteront une période charnière aussi déterminante que les années 1950 et 1960. Nous assistons déjà à une révolution en marche. Entre les vols suborbitaux, qu'on qualifie souvent de voyages « touristiques » (mais qui proposent aussi des places pour les scientifiques), et les séjours en orbite sur la Station spatiale internationale ou au-delà, les années à venir vont transformer notre relation avec le monde encore mystérieux régnant juste au-dessus de la Terre.

Un avenir suborbital

L'une des activités les plus productives (et, hélas, peut-être parmi les moins connues) de la NASA dans le domaine des vols spatiaux a été son programme suborbital, en place depuis des décennies. Dans ce cadre sont lancées chaque mois une ou deux missions courtes à bord de fusées non habitées « jetables », grâce auxquelles les chercheurs ont la possibilité de placer leurs instruments dans l'espace pendant quelques minutes jusqu'à 100 kilomètres d'altitude.

Malgré la brièveté de ces vols, ces missions suborbitales ont produit des résultats scientifiques clefs dans les domaines de la physique solaire, de l'étude des supernovae, de la science de la haute atmosphère, de l'astrophysique et de la recherche de comètes. En outre, ces vols sont très utiles pour tester les nouvelles techniques aérospatiales et des détecteurs avant leur intégration

1. LA FUSEE *FALCON 9* de *SpaceX* lance le vaisseau *Dragon* pour sa mission orbitale inaugurale en 2010. *SpaceX* est devenu depuis le symbole de nouveaux projets à destination de l'espace.

QUI NOURRIRA LA RÉVOLUTION DE LA RECHERCHE SPATIALE ?

Aller dans l'espace est une opération complexe. La recherche spatiale a longtemps été entravée par le coût élevé des vols et leur rareté. Mais toute une flottille appartenant à des entreprises privées est en train de voir le jour. Cela faciliterait l'accès à l'espace pour les chercheurs du monde entier. Les sociétés listées ci-dessous ne sont que les plus visibles parmi les dizaines qui espèrent promouvoir la présence humaine dans l'espace.

	VOL SUBORBITAL	VOL ORBITAL	VOL VERS LA LUNE	VOL DE LONGUE DURÉE
PRINCIPALES SOCIÉTÉS	Armadillo Aerospace, Blue Origin, Virgin Galactic, XCOR Aerospace	SpaceX	Astrobotic Technology, Moon Express	Bigelow Aerospace, Excalibur Almaz
AVANTAGES PAR RAPPORT AUX VOLS CLASSIQUES	Les lanceurs réutilisables permettent d'augmenter le nombre de vols et ainsi de réduire le coût par vol. Les chercheurs pourront aussi accompagner leurs expériences dans l'espace.	SpaceX a conçu ses fusées Falcon et ses capsules Dragon en partant de zéro, en privilégiant la simplicité et la fiabilité. Les vols sur *Falcon 9* coûtent la moitié d'un projet similaire dans le cadre traditionnel.	De petits alunisseurs robotisés seront les premiers vaisseaux à se poser sur la Lune depuis 1976. Des projets sont en cours pour sonder la région du pôle Sud lunaire à la recherche de glace d'eau.	Les stations gonflables de *Bigelow* sont légères et ainsi plus faciles à envoyer dans l'espace que la Station spatiale internationale (ISS). Leur volume n'est pas limité par les capacités de la fusée.
SITUATION ACTUELLE DES PROJETS	Les premiers vols d'essai sont en cours. Les premiers passagers devraient effectuer leur vol à partir de 2014.	La fusée *Falcon 9* a déjà livré un vaisseau *Dragon* pour ravitailler la Station spatiale internationale, le premier de 12 vols de ce type prévus.	Le *Google Lunar* X PRIZE récompensera la première équipe qui posera un robot sur la Lune et renverra une vidéo sur la Terre. *Moon Express*, l'une des équipes, prévoit sa mission d'ici 2015.	*Bigelow* a commencé à tester des stations prototypes en orbite terrestre basse en 2006. La NASA a annoncé qu'un module *Bigelow* sera attaché à l'ISS en 2015.

des missions coûtant plusieurs milliards de dollars, et ils ont servi à former un nombre considérable d'expérimentateurs spatiaux, notamment des astronautes, des spécialistes de l'atmosphère et des chefs de mission planétaire.

Bien que la communauté scientifique réclame depuis plus de 20 ans une augmentation importante de la fréquence des vols, le rythme de lancement du programme suborbital de la NASA est resté désespérément faible. Les raisons en sont nombreuses, mais sont surtout liées à leur coût. Le prix d'une de ces missions tourne autour de 2,5 millions de dollars, ce qui exclut des fréquences de lancement beaucoup plus élevées dans le cadre du budget de ce programme.

L'entrée en scène de nouveaux véhicules suborbitaux réutilisables, construits par des entreprises telles que XCOR *Aerospace*, *Virgin Galactic*, *Armadillo Aerospace*, *Masten Space Systems* et *Blue Origin*, devrait améliorer à la fois le rythme et la productivité de la recherche suborbitale.

Multiplier le nombre de vols

Comment est-ce possible ? Tout d'abord, en faisant voler des lanceurs réutilisables et non jetables, ces compagnies peuvent réduire les coûts de façon substantielle et augmenter leur fréquence. À elles deux, ces avancées complémentaires auront le même effet sur la recherche spatiale que la révolution des ordinateurs personnels sur l'informatique : créer une révolution de l'accès.

La NASA effectue à l'heure actuelle entre 20 et 25 lancements suborbitaux par an. Le fournisseur de vol suborbital *Virgin Galactic* prévoit que son premier véhicule volera à terme une fois par jour. Et chaque vol sera capable d'emporter six lots de matériel ou six chercheurs (ou un mélange des deux). Cette société pourrait à elle seule autoriser environ 2 000 expériences par an.

Mais *Virgin Galactic* n'est pas seule sur ce nouveau marché. XCOR *Aerospace*, un sérieux concurrent, envisage de procéder à quatre lancements par jour avec chacun de ses véhicules réutilisables, dont plusieurs ont déjà été loués à des pays tels que la Corée du Sud et l'État de Curaçao, une île antillaise. Imaginez la rapidité des progrès que les chercheurs peuvent espérer avec des vols aussi fréquents ! Les physiologistes, par exemple, pourraient récupérer tous les ans des centaines de jeux de données pour mesurer les effets de l'impesanteur sur les astronautes, contre une poignée d'études de ce type aujourd'hui.

Bien sûr, l'augmentation de la fréquence des vols ne suffit pas à elle seule à faire une révolution. L'autre atout clef de ces systèmes réutilisables est leur coût infé-

© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013

fieur. *Virgin Galactic* envisage de facturer 200 000 dollars la place de 100 kilogrammes (charge utile ou chercheur), soit environ dix fois moins cher qu'avec un lancement de fusée classique. Le prix annoncé par XCOR et par *Armadillo Aerospace* est même plus proche de 100 000 dollars.

La révolution des fusées réutilisables permettra aussi d'avancer dans de nouveaux domaines scientifiques. Par exemple, les chercheurs auront accès à la région atmosphérique de haute altitude, comprise entre 30 et 200 kilomètres. Ils la nomment l'« ignorosphère », car elle est trop haute pour être atteinte par des avions ou des ballons, mais trop basse pour que les satellites y évoluent sans retomber sur Terre. Les chercheurs pourront alors étudier de nombreux phénomènes atmosphériques, par exemple les mystérieuses rafales électriques de haute altitude que sont les farfadets (ou sylphes rouges) et les jets bleus.

Seules les fusées automatisées de la NASA accédaient à cette région mal connue. Or, les nouveaux véhicules offrent la possibilité d'embarquer les chercheurs avec leurs détecteurs. La recherche suborbitale pourrait avoir enfin droit elle aussi à ce dont tous les autres domaines de recherche jouissent depuis longtemps : un environnement de laboratoire où les scientifiques peuvent mener leurs propres expériences, sur place, sans devoir s'en remettre à des robots.

Bien que tout cela semble relever de la science-fiction, les chercheurs de certains laboratoires réservent déjà des places sur les vols pour eux-mêmes et pour leurs expériences. D'ici 2015, la technologie suborbitale de prochaine génération pourrait connaître le même essor que la technologie des fusées-sondes dans les années 1950 : aujourd'hui encore rare, demain presque banale.

Est-ce que cela constituerait en soi un changement radical ? Oui, mais la révolution va plus loin, et ces vols suborbitaux ne sont qu'une première étape ; d'autres types d'offre spatiale commerciale présentant un intérêt pour la communauté de la recherche spatiale sont en train d'émerger.

Aux États-Unis, les lanceurs qui ont historiquement été utilisés pour la plupart des missions scientifiques orbitales de la NASA (les fusées *Pegasus*, *Atlas* et *Delta*) ont tous vu leur coût plus que doubler depuis la fin des années 1990, à cause du statut de quasi-monopole des constructeurs qui peuvent arbitrairement fixer leurs prix. Lancer une petite mission scientifique à bord d'une fusée *Pegasus* coûtait environ 15 millions de dollars ; cela revient aujourd'hui à plus de 40 millions de dollars. Et le prix des fusées haut de gamme capables d'emporter les plus grosses charges utiles (les « lanceurs lourds » comme *Atlas V*) est passé de 150 à 350 millions de dollars.

Avec des budgets pour la science spatiale pris en étau entre les réductions du financement et les dépassements de coût, les directeurs de programmes spatiaux de la NASA pourraient voir une aubaine dans les nouveaux lanceurs commerciaux.

Prenons par exemple la famille de lanceurs *Falcon* créée par *SpaceX* : l'entreprise a dépensé moins d'argent pour concevoir, dessiner, développer, tester et rendre opérationnelle sa ligne de lanceurs *Falcon* qu'il n'en a fallu au gouvernement pour construire la simple tour de lancement de la fusée *Ares*, aujourd'hui abandonnée. *SpaceX* propose actuellement le *Falcon 9* pour environ 55 millions de dollars (environ la moitié de ce que coûte le lanceur moyen concurrent *Delta II*) et, en 2014, *SpaceX* projette de mettre en service un *Falcon* beaucoup plus gros, le *Falcon Heavy* ou FH. Le FH pourra embarquer environ deux fois la charge des plus grosses fusées *Atlas* et *Delta*, mais pour 100 millions de dollars seulement, moins du tiers du prix de ses concurrentes.

Des solutions moins coûteuses

Historiquement, la NASA a lancé trois à cinq missions de science en orbite par an. En envoyant ne serait-ce que la moitié de ces missions sur un *Falcon Heavy*, on économiserait deux à trois milliards de dollars sur cinq ans. Ces économies sont suffisantes pour monter plusieurs missions de l'envergure de *Discovery* vers d'autres planètes ou jusqu'à une dizaine de missions SMEX (*Small Explorer*, explorateur de petite taille) pour l'astronomie et la physique solaire. Ce serait même assez pour financer un nouveau rover martien ambitieux du type de *Curiosity*.

Les entreprises spatiales commerciales expérimentent une autre option encore pour réduire les coûts : la possibilité de greffer des charges utiles scientifiques sur des vols commerciaux. Par exemple, chacun des 72 vaisseaux de la constellation de satellites de communications *Iridium* de seconde génération offre (contre rémunération) de la place pour des instruments

L'AUTEUR

Alan STERN a dirigé les programmes de sciences spatiale et terrestre de la NASA. Il travaille à présent à l'Institut de recherche du Sud-Ouest (Southwest Research Institute) à Boulder dans le Colorado, aux États-Unis.

Un vol suborbital à 200 000 dollars

La société *Virgin Galactic* utilise un avion porteur, le *WhiteKnightTwo*, qui transporte l'avion-fusée *SpaceShipTwo* jusqu'à 15 kilomètres d'altitude. L'avion-fusée, qui embarque six passagers et le pilote, se décroche et entame une ascension verticale pour atteindre environ 110 kilomètres d'altitude. Quand sa vitesse devient nulle, débute une chute libre, peu freinée grâce à la ténuité de l'atmosphère. Les passagers sont alors en impesanteur pendant cinq minutes. Lorsque la densité de l'air devient importante, l'avion termine sa descente à la façon d'un planeur. La durée totale du vol est de deux heures.

© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013

scientifiques. La mission hôte couvre les coûts du lancement du ou des satellites, et les laboratoires ne contribuent que pour une fraction du montant.

Cependant, ce concept de « charge utile hébergée » reste un marché restreint. Il n'est pertinent que quand les instruments scientifiques peuvent tenir à bord de satellites de communications et fonctionner sur les orbites spécialisées de ces derniers. Cela n'est clairement pas destiné à de gros télescopes par exemple, ni à d'autres types de missions qui nécessitent leur propre satellite dédié. Cette solution permet néanmoins de lancer des charges utiles modestes pour quelques dizaines de millions de dollars, quand il en faut aujourd'hui plusieurs centaines pour lancer et exploiter une mission satellitaire.

Ces charges utiles hébergées pourraient bientôt emporter des instruments scientifiques bien au-delà de l'orbite terrestre. Plus d'une dizaine d'équipes dans le monde se sont inscrites au concours *Google Lunar* X PRIZE.

Des groupes tels que *Moon Express* et *Astrobotic* signent déjà des contrats pour transporter des charges utiles scientifiques jusqu'à la Lune. Ces entreprises et d'autres considèrent que le *Lunar* X PRIZE n'est qu'une première mission de démonstration. L'objectif à long terme est de trouver un revenu régulier en s'adressant aux chercheurs et aux pays qui n'ont pas les centaines de millions de dollars ni l'expérience technique pour aller eux-mêmes sur la Lune, mais qui ont de quoi acheter un compartiment de charge utile sur un alunisseur privé ayant fait ses preuves.

Un billet à dix millions de dollars reste 100 fois moins cher que les missions gouvernementales à un milliard de dollars.

De nombreux spécialistes de la Lune ou des planètes ont bon espoir qu'à de tels prix, le nombre de pays susceptibles d'envoyer des expériences sur la Lune va augmenter, créant une seconde renaissance pour l'étude de notre satellite.

CES INNOVATIONS REPRÉSENTENT
les premières nouvelles options que nous avons pour aller dans l'espace depuis les années 1950 et 1960

Au-delà de la Lune, *SpaceX* regarde déjà vers Mars et envisage la possibilité de réutiliser les vaisseaux cargo *Dragon*, initialement conçus pour ravitailler la Station spatiale internationale, et de les adapter pour emporter de grosses charges vers Mars. Cela coûterait des centaines de millions de dollars de moins que les récents modules atterrisseurs martiens. Si les responsables de *SpaceX* arrivent à convaincre la NASA ou les agences spatiales d'autres pays, ils réussiront peut-être à développer une nouvelle solution

L'histoire se répète-t-elle ?

La profusion de projets commerciaux privés que l'on observe aujourd'hui, tant vers des destinations orbitales que suborbitales (altitude inférieure à 100 kilomètres), avec des passagers ou des expériences automatiques, a déjà connu une poussée de fièvre similaire au début des années 1990.

À l'époque, une nouvelle classe de charges utiles prenait son essor : les constellations de satellites de télécommunication en orbite basse. La miniaturisation de l'électronique a favorisé la conception de satellites de communication beaucoup plus petits que les grosses plates-formes placées en orbite géostationnaire.

Une constellation en orbite basse est constituée d'un grand nombre de satellites, situés entre 600 et 1 500 kilomètres d'altitude, sur des orbites dont le plan orbital présente un angle d'au moins 60 degrés par rapport au plan de l'équateur. À tout endroit sur la Terre, même au voisinage des pôles, la visibilité simultanée de plusieurs satellites permet une bonne connexion qui n'est perturbée ni par la traversée de l'atmosphère ni par la distance.

Le projet le plus emblématique de l'époque fut sans doute *Teledesic*, proposé par Bill Gates. Le marché visé était celui des services Internet haut débit. Le projet initial prévoyait 840 satellites identiques, sans compter les satellites de rechange, placés sur une orbite circulaire à 700 kilomètres d'altitude. Le projet fut ensuite revu à la baisse, avec « seulement » 288 satellites (d'une masse au lancement de 1 400 kilogrammes chacun).

De nombreux projets similaires ont été proposés à cette période, notamment le MSTAR, qui prévoyait 72 satellites de deux tonnes à 1 000 kilomètres d'altitude, *Skybridge* (80 satellites à 1 450 kilomètres d'altitude), *Ellipso*, *Ecco*, *Iridium*, *Globalstar*…

Pour les concepteurs et les opérateurs de lancement, un tel nouveau marché représentait le Graal. La perspective d'avoir à lancer plusieurs milliers de satellites de plus de une tonne en orbite basse, quand le marché total de l'époque représentait une quinzaine de satellites en orbite basse et une trentaine de satellites géostationnaires par an, permettait d'envisager des changements draconiens dans les lanceurs et les opérations associées.

On vit alors fleurir un grand nombre d'initiatives privées, proposant des lanceurs plus originaux les uns que les autres, le plus souvent avancés par de grosses fortunes de l'Internet, à l'instar de ce qu'on note aujourd'hui.

Au début des années 1990, l'écrémage naturel et les lois de la physique ont fait le tri ! De nombreux projets étaient totalement ou partiellement réutilisables : le *Roton*, par exemple, était équipé d'un immense rotor d'hélicoptère, pour le freiner lors de sa rentrée dans l'atmosphère, et d'un moteur rotatif de grand diamètre innovant ; le *Kistler* K1 comportait un premier étage réutilisable, revenant se poser à la verticale sur sa base de lancement en Australie.

D'autres propositions étaient plus classiques : le *Conestoga* américain était composé d'un fagot de sept moteurs identiques ; une économie d'échelle devait réduire les coûts de production. Il explosa malheureusement lors de son premier vol ; le Litt-LEO, proposé par les Anglais de BAE *Systems*, était conçu de façon analogue, fagot de propulseurs solides et bon marché ; *Aérospatiale* (actuellement *Astrium*), associée à *Arianespace* et SEP, avait également étudié très sérieusement le PLS, Petit Lanceur spatial, dérivé d'étages à propulsion solide existants. La liste est longue…

Cet engouement pour l'espace culmina avec le concours Ansari X-Prize, lancé en 1996. Cette compétition récompensait la première organisation non gouvernementale qui lancerait dans l'espace un véhicule habité et réutilisable. Doté d'une récompense de dix millions de dollars, le prix fut remporté en 2004 par *SpaceShipOne*. Au total, 26 candidats ont participé au concours, dont une soucoupe volante, un lanceur sous ballon, un qui flottait dans l'océan avant son décollage… Cette compétition a permis le développement de cinq ou six concepts actuels identifiés dans l'article.

Puis le soufflé est retombé. Est-ce en raison de la complexité de l'accès à l'espace, sous-évaluée par ces opérateurs privés, ou, plus vraisemblablement, à cause de l'effondrement du marché lié à l'émergence des technologies de communication de proximité, fibre optique, câbles haut débit…? Quelques constellations ont survécu avec des ambitions commerciales revues à la baisse, et les lancements se font avec les lanceurs éprouvés et qualifiés à cette fin.

Souhaitons aux initiatives actuelles de connaître un destin plus florissant !

Christophe BONNAL
Académie internationale d'astronautique

© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013

bon marché pour la recherche martienne, à un moment où les agences spatiales du monde entier peinent à financer la poursuite de l'exploration de Mars.

Environ 90 pour cent des 194 pays de la planète ne sont pas partenaires de la Station spatiale internationale et ont donc peu de perspectives d'accès à cette grande station unique en son genre. Pour des nations telles que la Chine, l'Inde et la Corée du Sud, des stations spatiales commerciales privées pourraient être la meilleure voie pour des séjours de longue durée dans l'espace en vue de recherches scientifiques et techniques, sans parler du prestige national.

La première (et la plus connue) de ces initiatives est la station spatiale privée de *Bigelow Aerospace*. Sans trop de publicité, la société a déjà construit deux prototypes de station spatiale qu'elle teste en orbite terrestre basse. En proposant des places pour un maximum de six chercheurs, la première station habitée de *Bigelow* doublera le nombre de chercheurs en orbite. Ce faisant, et en utilisant des taxis spatiaux privés tels que le CST-100 en préparation chez *Boeing* ou le *Dragon* de *SpaceX* (tous deux conçus pour transporter des astronautes sur la Station spatiale internationale), la station de *Bigelow* pourrait bien offrir aux chercheurs, aux agences nationales et aux entreprises privées un accès plus rapide à l'espace pour un coût au moins deux fois inférieur au prix estimé d'un lancement *Soyouz* et d'un séjour sur la Station spatiale internationale.

Des stations spatiales privées

Mais *Bigelow* n'est pas la seule entreprise sur le créneau. Une autre société, *Excalibur Almaz*, projette de construire une station similaire, mais plus petite, qui utilisera des modules de station spatiale de rechange et des véhicules de transport d'équipage datant de l'ère soviétique.

Les capsules spatiales *Dragon* de *SpaceX* pourraient aussi être utilisées comme stations spatiales durables. Actuellement, les véhicules *Dragon* sont sous contrat avec la NASA pour faire la navette avec du fret jusqu'à la Station spatiale internationale. Dans un avenir proche, elles pourraient aussi transporter des astronautes, mais le potentiel des capsules *Dragon* ne s'arrête pas là. *SpaceX* projette à la fois des missions « DragonLab » automatiques et habitées qui peuvent monter en orbite terrestre, s'y

2. LE VAISSEAU *DRAGON* de *SpaceX* ravitaille la Station spatiale internationale pour la première fois en mars 2013.

attarder quelques semaines ou quelques mois pour effectuer des recherches avec des charges utiles internes ou externes, et cela pour un coût inférieur à celui que facturent vraisemblablement les stations spatiales commerciales.

Ces innovations représentent les premières options fondamentalement nouvelles que nous avons pour aller dans l'espace depuis les années 1950 et 1960, époque où sont apparus la recherche suborbitale, les missions planétaires et les satellites en orbite terrestre. Mais nous en sommes encore à la première phase de cette révolution commerciale, et de nombreuses questions subsistent. Dans quelle mesure les entreprises émergentes vont-elles modifier la science spatiale et inspirer le grand public ? Parviendront-elles rapidement à convaincre davantage d'entrepreneurs de rejoindre la révolution spatiale commerciale ? La réponse dépend notamment de la capacité à innover dont les chercheurs et les agences spatiales feront preuve, et de la rapidité avec laquelle ils apprendront à s'adapter au monde de l'espace commercial et à l'exploiter.

Si l'aventure commerciale suborbitale et orbitale connaît le succès, elle pourrait ouvrir une nouvelle voie pour explorer les astéroïdes et les planètes du Système solaire. La science en tirerait des bénéfices comparables à ce qu'elle a connu quand des expéditions privées ont accédé aux régions polaires. Mais, contrairement aux pôles, dans l'espace, on peut aller toujours plus loin… ■

SUR LE WEB

Programme de la NASA de développement commercial pour équipages :
www.nasa.gov/offices/c3po/home

Fédération des vols spatiaux commerciaux :
www.commercialspaceflight.org

BIBLIOGRAPHIE

D. Freedman, **Vers la privatisation des vols spatiaux**, *Pour la Science*, n° 400, février 2011.

M. Belfiore, **Rocketeers : How a Visionary Band of Business Leaders, Engineers, and Pilots Is Boldly Privatizing Space**, Harper Perennial, 2008.

L'ESSENTIEL

- L'amphithéâtre romain était à l'origine une *spectacula*, c'est-à-dire une installation conçue pour donner à voir les combats.
- D'abord en bois, il a dans un premier temps gardé la forme arrondie que lui avaient donnée les charpentiers.
- Puis l'arène elliptique, qui évite tout angle mort, est apparue. Elle s'est généralisée, sauf dans les cas où l'amphithéâtre devait aussi jouer le rôle de théâtre.
- L'amphithéâtre a alors atteint une perfection technique, qui explique que les arènes de Fréjus, d'Arles et de Nîmes soient toujours utilisées.

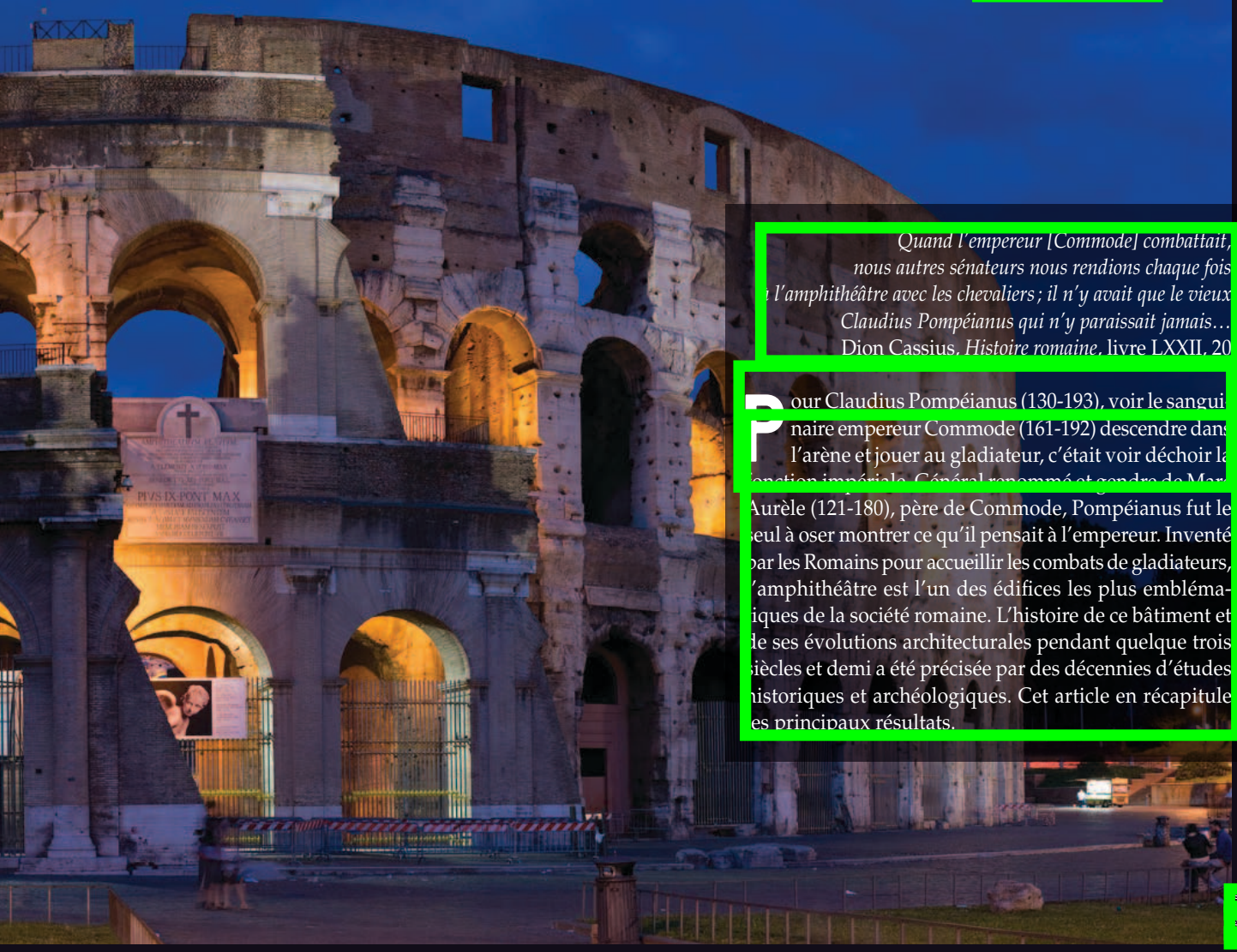
L'

1. LE COLISEE A ROME, immense amphithéâtre dont l'arène est elliptique, pouvait accueillir jusqu'à 75 000 spectateurs. Ceux-ci observaient la scène sans angles morts, et sans risques de mouvements de foule dangereux.

amphithéâtre romain
une architecture optimale

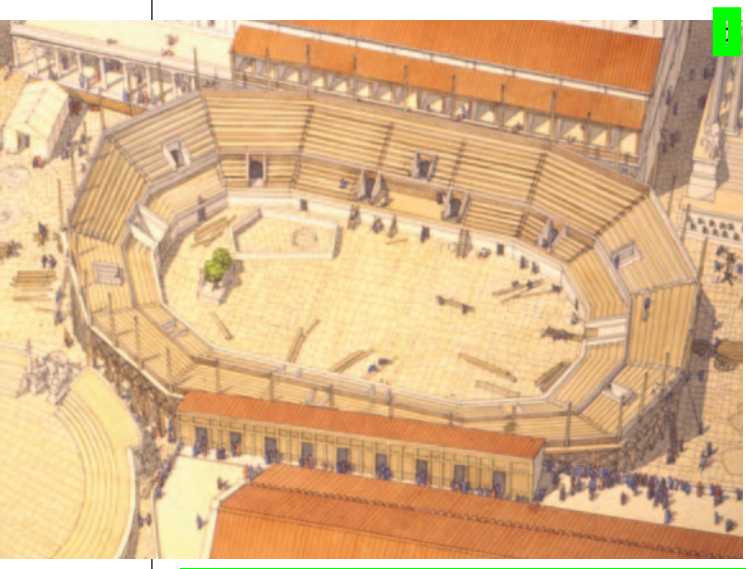
La *spectacula*, qui deviendra l'amphithéâtre, est le seul grand édifice antique spécifiquement romain. Il est le fruit de siècles d'une étonnante optimisation architecturale.

Jean-Claude Golvin



Quand l'empereur [Commode] combattait, nous autres sénateurs nous rendions chaque fois à l'amphithéâtre avec les chevaliers ; il n'y avait que le vieux Claudius Pompéianus qui n'y paraissait jamais…
Dion Cassius, *Histoire romaine*, livre LXXII, 20

Pour Claudius Pompéianus (130-193), voir le sanguinaire empereur Commode (161-192) descendre dans l'arène et jouer au gladiateur, c'était voir déchoir la fonction impériale. Général renommé et gendre de Marc Aurèle (121-180), père de Commode, Pompéianus fut le seul à oser montrer ce qu'il pensait à l'empereur. Inventé par les Romains pour accueillir les combats de gladiateurs, l'amphithéâtre est l'un des édifices les plus emblématiques de la société romaine. L'histoire de ce bâtiment et de ses évolutions architecturales pendant quelque trois siècles et demi a été précisée par des décennies d'études historiques et archéologiques. Cet article en récapitule les principaux résultats.



CES QUELQUES RESTITUTIONS D'AMPHITHÉATRES ROMAINS illustrent la variété des formes de ce type de bâtiments. En *a*, une restitution théorique d'un amphithéâtre en bois, tel qu'on en construisait sur le *forum Romanum* à Rome au IIe siècle avant notre ère. On note les demi-cercles délimitant l'arène et les gradins de bois des tribunes, déjà en pente pour améliorer la perception du spectacle. L'amphithéâtre construit à Pompéi vers 70 avant notre ère *(b)* est un cas de transition entre la forme primitive d'arène et l'arène elliptique. On le note à sa construction sur un soubassement délimité par des demi-cercles, donc de

L'AUTEUR

Jean-Claude GOLVIN, architecte et archéologue, est directeur de recherche émérite au CNRS

BIBLIOGRAPHIE

J.-Cl. Golvin, **L'amphithéâtre romain et les jeux du cirque dans le monde antique,** Archéologie Vivante, 2012.

C. Teyssier, **La mort en face - Le dossier Gladiateurs,** Actes Sud, 2009.

A. Berlan-Bajard, **Les spectacles aquatiques romains,** Collection de l'École française de Rome, vol. 360, 2006.

P. Gros, **L'architecture romaine - 1. Les monuments publics,** Picard, 1996.

J.-Cl. Golvin, **L'amphithéâtre romain,** Centre Pierre Paris/De Boccard, 1988.

A travers l'Empire romain, plus de 250 amphithéâtres romains nous sont connus. Ils ont souvent laissé d'impressionnants vestiges. Ceux de Fréjus, d'Arles et de Nîmes ont si bien résisté au temps que l'on y organise toujours des combats… de taureaux. Dans le cas des arènes de Nîmes et d'Arles *(voir la figure 2)*, des foules de 20 000 à 25 000 personnes pouvaient accéder au spectacle et en revenir facilement ; les effectifs atteignaient 50 000 à 75 000 spectateurs dans le cas du Colisée de Rome…

Lieux pour combats privés

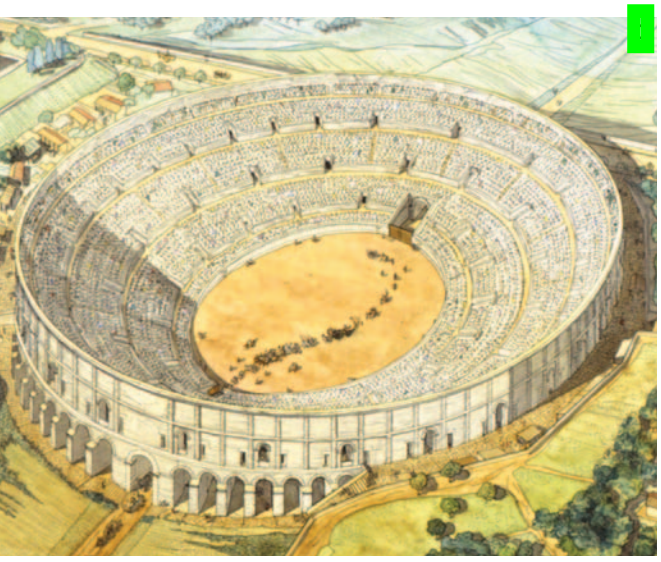
Comment étaient construits de tels édifices ? Normalement de forme elliptique, un amphithéâtre est constitué d'une arène (du latin *arena* pour sable), comportant des gradins étagés *(cavea)* ainsi qu'un système de circulation interne pour y accéder (escaliers d'accès, galeries de circulation) et des espaces techniques (ascenseurs, caves, etc.).

L'invention des amphithéâtres trouve son origine dans un trait culturel italique : l'habitude d'organiser des combats privés rituels qu'avaient prise plusieurs peuplades de l'Italie antique. Leurs premières représentations se trouvent sur les parois des tombes de Paestum en Lucanie, c'est-à-dire dans la région centrale de la botte italienne, entre Pouilles et Calabre ; elles sont datées de 370 à 340 avant notre ère, ce qui suggère que la coutume est originaire d'Italie du Sud.

Quoi qu'il en soit, les scènes représentées à Paestum montrent deux antagonistes qui s'affrontent en présence d'un arbitre. Ils portent les mêmes armes et leurs panoplies ne diffèrent pas de celles des guerriers de l'époque. Pour autant, leurs affrontements ayant lieu dans un contexte funéraire et sacré, il ne s'agissait pas d'une forme de sacrifice humain, mais de combats spectaculaires, donnés à l'occasion de jeux funèbres, où le sang versé était censé honorer les mânes du défunt. Un proche du défunt faisait l'offrande d'un spectacle, d'où le nom donné à ce type de combat : *munus*, au pluriel *munera*, qui signifie « don ». Un simple terrain aménagé devant les tombes, éventuellement cerné d'une palissade provisoire, suffisait probablement comme cadre aux premiers spectacles.

Dès le début, s'étaient ainsi différenciées les deux parties essentielles d'un programme monumental : une aire de combat centrale où évoluaient les combattants, et une zone périphérique où se tenaient les spectateurs.

© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013



forme primitive. L'amphithéâtre de Saintes *(c)*, probablement construit sous le règne de Tibère (14-37), est restitué au moment de la *pompa*, c'est-à-dire du défilé des gladiateurs ; implanté dans un vallon, il présente lui aussi une arène elliptique « optimisée », dont le grand axe vaut approximativement 1,5 fois le petit axe.

L'amphithéâtre de *Leptis Magna (d)*, en Libye, a été creusé dans le roc sous le règne de Néron (54-68) ; ce grand amphithéâtre avait la forme de deux théâtres accolés, afin de pouvoir y tenir aussi des représentations... théâtrales ; sous le soleil intense de Libye, un *velum* (un toit de toile) était prévu.

Les combats privés sont ensuite attestés sur des urnes étrusques, qui révèlent une différenciation des deux adversaires. Armés différemment, ils jouent désormais un rôle complémentaire : on oppose un gladiateur bien protégé et puissamment armé à un autre plus léger et plus rapide. Le spectacle se théâtralise. Déjà, il se professionnalise et, progressivement, devient un genre constitué de spécialités affirmées, reconnaissables aux armes portées.

Le premier combat attesté à Rome fut donné dans une nécropole voisine du cirque Maxime en 264 avant notre ère. Par la suite, le succès grandissant de ces spectacles et la volonté de leur conférer un maximum d'effet ont incité à les donner sur la place publique des villes d'Italie ; à Rome, c'était sur le *Forum Romanum*. Les donateurs ne pouvaient pas trouver de lieu plus prestigieux et symbolique que cette vénérable place publique située sur le parcours de la *Via Sacra* (voie romaine traversant le *Forum Romanum*) emprunté par les cortèges des triomphes. Petit à petit, l'organisation de combats devient plus fréquente et le lien avec les funérailles s'est distendu. Ces combats perdirent de leur caractère sacré pour devenir un spectacle pur, exerçant une fascination marquée sur le public.

Recouvert de sable, le sol de l'aire de combat est devenu l'arène. Le sable évitait aux combattants de glisser et facilitait une remise en état rapide après chaque confrontation. L'architecte romain Vitruve (–90 à –20) a insisté sur le fait qu'un *forum* romain devait être rectangulaire, en préconisant que le rapport idéal de ses côtés soit égal à 3/2. Cette forme et ce rapport expliquent l'allongement de l'arène des amphithéâtres et les proportions de ses axes. De même, l'importance moyenne de la superficie des forums a déterminé celle de l'aire de jeux sur laquelle le genre s'est fixé.

Des jeux de plus en plus fréquents et longs

L'augmentation considérable de la fréquence et de la durée des jeux dut poser des difficultés croissantes, car la place publique était trop souvent encombrée et ses autres fonctions (commerciale, judiciaire et sacrée) étaient perturbées. Cette situation a encouragé la création d'un monument permanent dédié à cette activité. Toutefois, cette innovation n'eut pas lieu à Rome, sans doute en raison du prestige inégalable du *Forum Romanum* qui a été utilisé le plus longtemps possible. À Rome et parallèlement au *forum*, on mit à contribution un autre monument pour l'organisation de grands affrontements, le *Circus Maximus* : il vit l'apparition des premiers combats d'animaux, que l'on nommait des « chasses » *(venationes)*.

Cependant, il est probable que la forme elliptique, qui allait devenir la caractéristique majeure des amphithéâtres romains, résulte du perfectionnement des édifices de bois provisoires qui étaient montés sur le *Forum Romanum* pour le déroulement des combats *(voir l'encadré ci-dessus, a)*. Les architectes auraient fini par se rendre compte que la forme idéale de l'arène était celle pouvant combiner au mieux son allongement d'origine et une courbure du mur du *podium* supprimant les angles morts pour les spectateurs.

Précisons que le *podium* était la partie inférieure de l'espace dévolu aux spectateurs : surmontant l'arène de trois à six mètres, il constituait une sorte de galerie où prenaient place les personnages importants, et qui cachait un tunnel interne de circulation. La forme elliptique de l'arène favorisait l'évolution des combattants et la vision d'ensemble qu'en avaient les spectateurs. En outre, la surface de l'arène était ainsi pleinement utilisée.

© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013

Ces édifices en bois n'ont pas laissé de traces, mais on peut penser que le soubassement de l'amphithéâtre de Pompéi, avec ses deux extrémités semi-circulaires, rappelle la forme archaïque de leur plan. Ce type de monument fut longtemps nommé *spectacula*, ce qui signifie « lieu d'où l'on peut voir » ; ce n'est qu'au IIe siècle de notre ère que l'on commença à employer à leur propos le terme d'amphithéâtre, allusion au fait qu'on les a d'abord obtenus en accolant face à face deux théâtres ; on peut donc le traduire par « double théâtre », voire « théâtre rond ».

Une formule architecturale désormais au point

À Pompéi, il semble que les architectes du *spectacula* édifié vers 70 avant notre ère aient commencé l'édifice selon un plan de type ancien, puis changé d'idée en cours de chantier, pour appliquer la formule nouvelle inventée à Rome *(voir l'encadré page 60, b)*. Ils construisirent ainsi à l'intérieur du soubassement déjà achevé un monument elliptique et furent les premiers à en réaliser un d'une telle ampleur. L'amphithéâtre, désormais libéré de l'espace contraignant du *forum*, pouvait accueillir un grand nombre de spectateurs. Il était possible de le construire n'importe où en périphérie de la ville, ce qui évitait d'encombrer la place publique et n'imposait plus de démontages fréquents. D'une formule provisoire et insatisfaisante, on était passé à une architecture définitive et efficace.

L'amphithéâtre de Pompéi, cas unique, représente le monument de transition qui montre comment et quand on est passé d'une forme à l'autre. Il est en effet bien daté, par une inscription, de l'année 75 avant notre ère. Tous les amphithéâtres construits par la suite reproduiront ce plan elliptique, si caractéristique du rapport étroit existant entre la forme et la fonction de l'édifice. La formule architecturale était désormais au point.

L'arène de forme elliptique était délimitée par le mur du *podium* (haut de 2,5 mètres au moins) dont la paroi était lisse pour ne pas donner prise aux animaux qui auraient tenté de s'échapper. En arrière du *podium* courait un corridor de service permettant l'accès des gladiateurs et dont les portes de bois s'ouvraient en direction de l'arène. Aux extrémités du grand axe se trouvaient des portes à doubles battants pour l'entrée des animaux les plus grands et l'évacuation de leurs cadavres après les combats.

Autour de l'arène s'étendait la *cavea* (l'ensemble concave des gradins), où le public se répartissait par catégories selon des règles très strictes fixées à Rome par Auguste. Les places les plus prestigieuses se trouvaient en bas, sur le *podium* ; les moins bonnes, tout en haut, étaient réservées aux femmes et aux hommes de basse condition. Le point de mire était la loge, située à une extrémité du petit axe, où prenait place la plus haute autorité présente. C'était l'endroit d'où l'on voyait le mieux et d'où l'on était aussi le mieux vu du public. Les spectateurs passaient par des galeries, passages et escaliers situés sous les gradins et débouchaient dans la *cavea* au plus près de leur place. Des indications portées sur le jeton *(tessera)* qu'on leur avait remis leur donnaient la marche à suivre. Le remplissage se faisait ainsi rapidement, sans confusion.

Un amphithéâtre transitoire

Près de l'amphithéâtre de Pompéi se trouvait le *campus*, un vaste terrain libre entouré d'un portique et propre aux exercices sportifs et à l'entraînement des militaires comme des gladiateurs. La ville possédait aussi une caserne de gladiateurs (ou *ludus*) installée sur l'emplacement du quadriportique du théâtre après le tremblement de terre de l'an 62. Ces professionnels y étaient formés selon leurs spécialités *(armaturae)* et y séjournaient avec leur famille. La caserne où vivait l'ensemble des gladiateurs (la *familia gladiatoria*) était dirigée par un entrepreneur privé (le laniste) qui achetait, formait, puis louait ou vendait les gladiateurs pour un coût considérable. Cela explique que, contrairement à l'opinion répandue, le perdant était rarement mis à mort s'il avait survécu au combat *(voir ci-contre)*. Il ne l'était que s'il avait vraiment déçu le public.

Rome n'eut pas d'amphithéâtre permanent avant longtemps. Ainsi, les jeux liés au quadruple triomphe de César, en 46 avant notre ère, eurent lieu dans le grand cirque *(Circus Maximus)* et sur le *Forum Romanum* où l'on construisit, une fois de plus, un amphithéâtre provisoire en bois. Les galeries qui furent aménagées sous le

La gladiature, une comédie pour amphithéâtre

« Spectacle » vient de *spectacula*, premier nom de l'amphithéâtre. C'était en effet un lieu où l'on venait voir ce que les Romains trouvaient spectaculaire : des combats.
Il pouvait s'agir de luttes avec des animaux, de batailles navales, de massacres de condamnés, de combats de gladiateurs.
Ces combattants surentraînés, esclaves ou volontaires sous contrat, représentaient un tel investissement pour leur propriétaire-entraîneur que leur mise à mort après une défaite était rare et seulement due à la cruauté d'un public déçu…

© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013

2. DEPUIS 2000 ANS, LES AMPHITHEATRES sont en Occident signe de romanité. Ceux d'Arles *(à gauche)* et de Nîmes *(à droite)* ont été construits sur le modèle du Colisée à la fin du Ier siècle de notre ère, c'est-à-dire qu'ils comportent une arène elliptique, de nombreuses travées d'accès et un système interne de circulation pour 20 000 à 25 000 spectateurs ; celui de Nîmes est sans doute l'amphithéâtre le mieux conservé au monde, car sa *cavea* (ses gradins), ses couloirs internes et sa façade étaient largement intacts au XIXe siècle lors de la première restauration.

dallage de la place à cette occasion offrent le premier exemple d'utilisation d'un sous-sol en relation avec l'arène.

Les liens de la gladiature avec l'armée étaient étroits, et cela concerne aussi l'architecture. Il faut dire que les monuments romains ont toujours été réalisés par les *architecti* (ingénieurs) militaires. Les premiers amphithéâtres ont eu ainsi un caractère utilitaire, massif, lourd, une structure pleine, des façades peu ouvertes, des murs en petit appareil aux angles renforcés par des blocs de grand appareil à bossages.

Aucun amphithéâtre en dur n'existera à Rome avant le règne d'Auguste, au cours duquel fut construit un premier exemple dû au richissime Statilius Taurus. Cela explique que Vitruve ne dise rien de ce type de monument dans son traité d'architecture dédié à Auguste. Ce théoricien ne considérait pas l'amphithéâtre comme un édifice noble et méritant d'être mentionné, alors qu'il s'est étendu longuement sur l'architecture du théâtre. Du reste, le caractère assez rustique des premiers amphithéâtres en dur est perceptible dans celui qui a été réalisé sous le règne de Tibère (de 14 à 37) à Saintes (en Saintonge) dans un creux de vallon *(voir l'encadré page 61, c)*.

Ensuite est apparu sous le règne de Néron (54-68) un type d'édifice singulier, car cet empereur amateur de culture grecque voulut promouvoir des jeux comprenant à la fois des combats de gladiateurs et d'animaux et des représentations de type grec (épreuves sportives et musicales) qui imposaient des contraintes acoustiques particulières. D'où la forme semi-circulaire des extrémités d'un édifice daté de ce règne, l'amphithéâtre de *Leptis Magna* en Libye *(voir l'encadré page 61, d)*. Sa forme est sans doute proche de celle du grand amphithéâtre de bois construit peu avant par Néron à Rome, qui disparut dans le grand incendie de 64.

L'architecture des amphithéâtres est alors devenue plus élégante (à Vérone ou Pula). Elle s'inspire désormais de celle des grands théâtres romains. Les gradins sont supportés par une structure faite de murs rayonnants et de voûtes à l'intérieur de laquelle courent les galeries et les escaliers d'accès. Cette structure permet de construire des édifices de grandes dimensions, même sur un terrain parfaitement plat ; elle sera souvent adoptée par la suite pour la construction des plus grands amphithéâtres.

La « huitième merveille du monde »

Aucun monument n'a surpassé en magnificence le Colisée. Avec sa capacité de 50 000 places et ses 188 mètres de long, l'amphithéâtre de Rome surclassait de si loin les autres édifices similaires que le poète Martial (40-104) le considérait comme la « huitième merveille du monde », c'est-à-dire celle qui était capable d'éclipser toutes les autres.

Vespasien (9-79) voulut installer l'édifice en plein cœur de Rome et sur l'emplacement du grand lac d'agrément de la *Domus Aurea* de Néron, rendant ainsi au peuple romain un espace public d'agrément à l'endroit où l'empereur de sinistre mémoire avait spolié une multitude de gens pour se faire construire son immense palais.

Construit sous les règnes des trois empereurs de cette dynastie, cet extraordinaire édifice porta dans l'Antiquité le nom d'Amphithéâtre Flavien. C'est le colosse *(colossus)* de bronze doré de 30 mètres de haut, déplacé par Hadrien et redressé devant la façade, qui incita par la suite à confondre le nom du monument *(colosseum)* avec celui de la statue, d'où son nom actuel de Colisée.

Haute de 50 mètres, la façade du Colisée comprenait trois niveaux de galeries à arcades et un étage d'attique où étaient emmanchés les mâts de bois de l'immense *velum* (toit de toile) que l'on tendait pour protéger les spectateurs du soleil ; un détachement de la flotte de Misène (le plus grand port militaire romain dans la région de Naples) avait été commis à son déploiement.

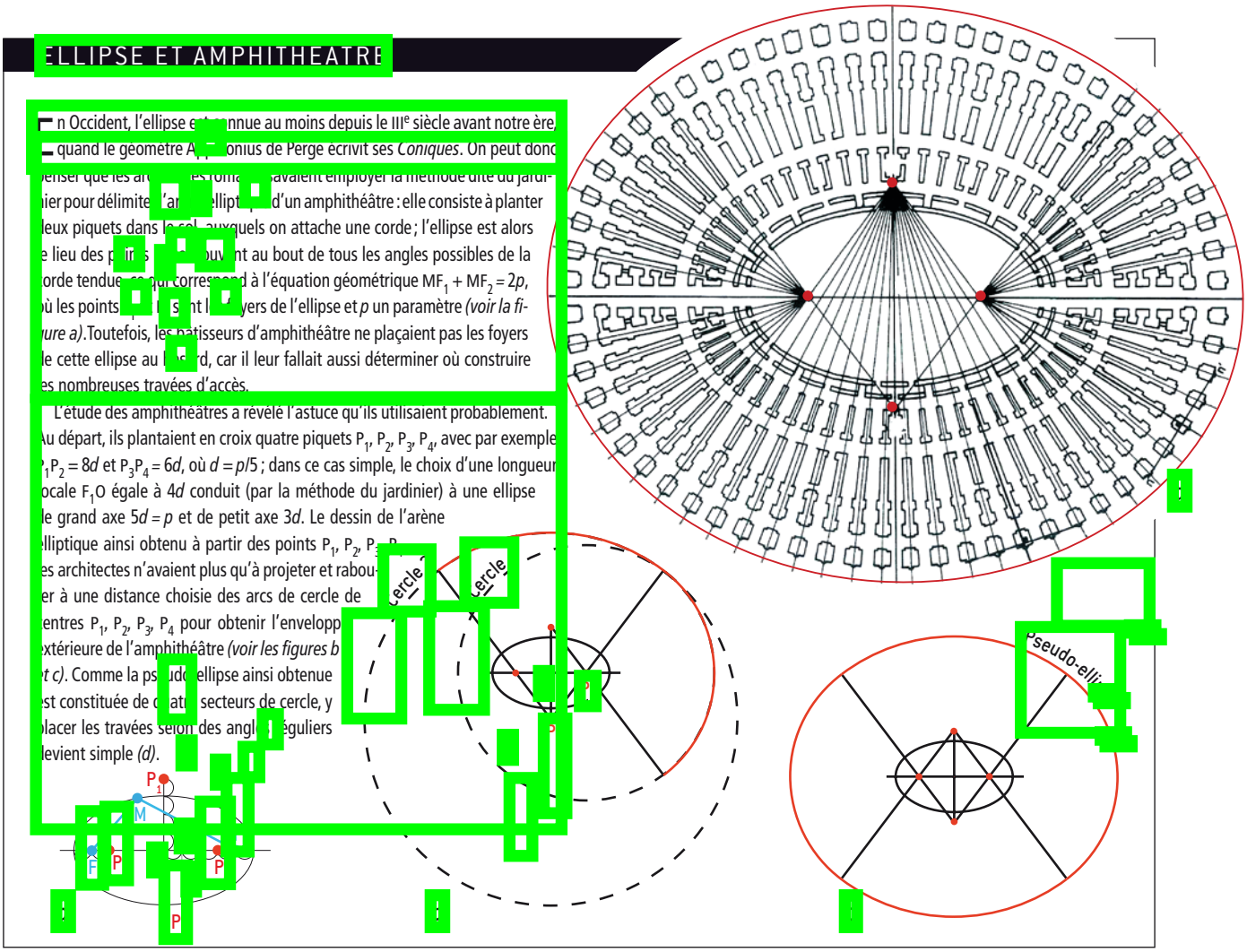
Ces marins vivaient dans une caserne proche de l'amphithéâtre, au sein du quartier entièrement consacré à son fonctionnement où l'on trouvait aussi la grande caserne des gladiateurs (le *ludus Magnus*) reliée au Colisée par un souterrain et d'autres plus petites *(ludus Dacicus, ludus Gallicus)*, celle des spécialistes des combats d'animaux *(Ludus Matutinus)*, les ateliers des machines *(Summum Choragium)*, l'hôpital des gladiateurs *(Saniarium)*... Cela donne une idée des importants aménagements que nécessitait le fonctionnement d'un grand amphithéâtre : bâtiments de service, espaces de dégagement, voies d'accès.

Il est certain que cette réalisation eut une influence considérable et qu'elle inspira la construction d'amphithéâtres sur ce modèle, bien qu'à une moindre échelle, dans les plus grandes villes d'Italie (Capoue,

ELLIPSE ET AMPHITHÉATRE

En Occident, l'ellipse est connue au moins depuis le IIIe siècle avant notre ère, quand le géomètre Apollonius de Perge écrivit ses *Coniques*. On peut donc penser que les architectes romains avaient employé la méthode dite du jardinier pour délimiter l'arène elliptique d'un amphithéâtre : elle consiste à planter deux piquets dans le sol, auxquels on attache une corde ; l'ellipse est alors le lieu des points qui se trouvent au bout de tous les angles possibles de la corde tendue, ce qui correspond à l'équation géométrique $MF_1 + MF_2 = 2p$, où les points F_1 et F_2 sont les foyers de l'ellipse et p un paramètre *(voir la figure a)*. Toutefois, les bâtisseurs d'amphithéâtre ne plaçaient pas les foyers de cette ellipse au hasard, car il leur fallait aussi déterminer où construire les nombreuses travées d'accès.

L'étude des amphithéâtres a révélé l'astuce qu'ils utilisaient probablement. Au départ, ils plantaient en croix quatre piquets P_1, P_2, P_3, P_4, avec par exemple $P_1P_2 = 8d$ et $P_3P_4 = 6d$, où $d = p/5$; dans ce cas simple, le choix d'une longueur focale F_1O égale à $4d$ conduit (par la méthode du jardinier) à une ellipse de grand axe $5d = p$ et de petit axe $3d$. Le dessin de l'arène elliptique ainsi obtenu à partir des points P_1, P_2, P_3, P_4 les architectes n'avaient plus qu'à projeter et raboutir à une distance choisie des arcs de cercle de centres P_1, P_2, P_3, P_4 pour obtenir l'enveloppe extérieure de l'amphithéâtre *(voir les figures b et c)*. Comme la pseudo-ellipse ainsi obtenue est constituée de quatre secteurs de cercle, y placer les travées selon des angles réguliers devient simple *(d)*.



Pouzzoles) et de ses provinces. Deux beaux exemples nous en sont donnés dans les Gaules par les amphithéâtres d'Arles et de Nîmes *(voir la figure 2)* ou en Afrique par l'amphithéâtre d'El Jem dans la province de Carthage, en Tunisie.

L'architecture très bien conservée de ces monuments nous permet de restituer l'ambiance d'une journée de combat conforme à la règle (le déroulement d'un *munus legitimus*). Elle comprenait la pompe inaugurale, puis, pendant toute la matinée, des *venationes* dans un décor approprié et renouvelable (exhibition d'animaux rares, combats d'animaux entre eux, chasses) avec de petits intermèdes (jongleurs, pitres et séquences musicales). L'heure méridienne (mi-journée), où l'attention était relâchée pendant le repas, convenait à l'exécution des condamnés qui étaient livrés aux fauves *(damanatio ad bestias)*. L'après-midi était consacrée au spectacle le plus apprécié : les combats de gladiateurs. Chaque *munus* consistait en un affrontement unique entre deux antagonistes en présence d'un arbitre et ne durait que quelques minutes.

L'arène est elliptique, mais pas l'enveloppe

L'arène de ces grands monuments était dotée d'un sous-sol accessible depuis l'extérieur, où les fauves étaient parqués peu avant le combat. Les cages des animaux et les décors étaient hissés au niveau de l'arène par des monte-charge permettant de multiples effets de mise en scène. Quelques rares amphithéâtres (Mérida, Vérone) indiquent la présence, au milieu de l'arène, de bassins permettant le déroulement de spectacles nautiques (les naumachies). Ce type de spectacles, attesté lors de l'inauguration du Colisée par Titus en 80, fut rapidement abandonné par la suite et les sous-sols transformés pour ne comprendre que les pièces d'accueil des fauves *(carceres)*, des espaces de service et les monte-charge.

Ainsi, l'étude des amphithéâtres a révélé l'ingéniosité avec laquelle leur plan était conçu. En particulier, leurs architectes ont su résoudre un problème de géométrie difficile dû à l'impossibilité de tracer des ellipses parallèles à partir des mêmes foyers. Au lieu de cela, ils ont doté l'amphithéâtre d'une enveloppe pseudo-elliptique en raccordant des segments de cercles, dont les centres sont les sommets de quatre triangles (dits de Pythagore) posés sur les axes de l'arène *(voir l'encadré ci-dessus)*. Les axes des murs rayonnants de la structure convergent donc vers ces quatre centres et sommets des triangles. Avec un simple cordeau, un architecte disposant d'une surface plane assez grande pour y poser l'arène pouvait ainsi développer le plan précis d'un immense amphithéâtre. ■

© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013

COLLECTION POUR LA SCIENCE LES PETITS THÉMATIQUES

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

Les économistes cherchent à quantifier la notion de bonheur. Mais les méthodes qu'ils élaborent sont à manier avec précaution et produisent des résultats aussi intéressants que difficiles à interpréter…

La mesure du bonheur

Joachim Weimann, Ronnie Schöb et Andreas Knabe

Connaissez-vous *Homo economicus* ? C'est nous ! Du moins « nous » tels que les économistes nous décrivent. Quand ils construisent leurs théories, ils supposent que nous agissons toujours de façon rationnelle, avant tout pour nous procurer des biens matériels, et que nous favorisons surtout nos parents proches. Au moins 90 pour cent des modèles économiques sont construits en supposant que les gens se conduisent ainsi… Dans le monde entier, des économistes se servent de ces modèles pour analyser les marchés ou se demander comment organiser la société afin d'optimiser l'emploi de ressources limitées. Malgré leur évidente imperfection, ces modèles sont efficaces et expliquent bien de nombreux phénomènes économiques ; en outre, l'idée que les humains seraient égoïstes ne semble pas dénuée de pertinence…

Pour autant, les économistes qui étudient la satisfaction des individus face à leur vie ont émis l'hypothèse selon laquelle revenus et bonheur ne sont pas directement liés, et que l'on peut s'enrichir sans devenir pour autant plus heureux en proportion. Nous allons détailler les observations et les considérations qu'appelle cette thèse. Puis nous examinerons les récents résultats qui la remettent en cause et qui montrent aussi que la façon dont nous évaluons notre satisfaction évolue avec le temps, tout en étant différente suivant la dimension du bonheur que nous considérons.

Le modèle rationnel mis en question

Le modèle rationnel (en anglais le *Rational economic model*) que les économistes ont fondé sur le concept de *Homo economicus* dérive de ce que l'on nomme la théorie économique néoclassique. Ce modèle est fortement critiqué : deux types d'objections lui sont opposés.

Le premier provient des laboratoires d'économie comportementale, où l'on sait bien que l'être humain ne se comporte que partiellement de façon rationnelle. Ainsi : les individus ont des motivations altruistes en plus de leurs motivations égoïstes ; ils sont dotés d'un sens de la justice, de sorte qu'ils agissent volontiers suivant le principe de l'échange équitable : « Ce que tu fais pour moi, je le fais pour toi » ; enfin, ils cherchent toujours à éviter les grandes injustices.

Des expériences de laboratoire ne cessent en effet de faire apparaître des motivations altruistes. Quelle force ont-elles vraiment ? Les constatations s'accumulent et montrent que si les gens adoptent bien des comportements altruistes, ils le font à l'intérieur de certaines limites. Il s'avère par exemple que lorsque les mêmes inte-

© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013

L'ESSENTIEL

- De hauts revenus seraient synonymes de bonheur. Toutefois, la recherche économique a relativisé l'idée selon laquelle l'argent fait le bonheur.
- L'économiste Richard Easterlin a même émis l'idée que l'on peut s'enrichir sans devenir plus heureux pour autant.
- Des chercheurs ont ensuite montré que notre satisfaction subjective dans la vie varie au cours du temps, tout comme nos critères en matière de bonheur.

actions se répètent, la générosité cède vite le pas à l'égoïsme. Illustrons cela par une expérience récente, simple et instructive : deux fois dans la journée, les participants recevaient de l'argent tout en étant informés qu'ils pouvaient soit le garder pour eux, soit en donner à une organisation caritative. Résultat ? Le matin, ils offraient plus de la moitié de l'argent reçu, mais, l'après-midi, la somme offerte ne dépassait pas le quart de la somme reçue…

Le second type d'objections portées au modèle rationnel provient des économistes qui étudient le bien-être. Il est bien connu que la compétition favorise les actes égoïstes. C'est cette réalité qui explique que les économies de marché se développent plus vite que les autres systèmes économiques. En conséquence, le revenu national augmente en même temps que le revenu personnel. Les économistes se sont habitués à considérer cela comme l'expression du succès de l'économie de marché, selon le principe que, plus un revenu est élevé, plus il procure d'aisance, de sécurité et de qualité de vie.

Le paradoxe d'Easterlin

Toutefois, en 1974, le théoricien américain de l'économie du bien-être Richard Easterlin effectua une étude empirique sur les rapports entre argent et bonheur, qui renversa l'image convenue de l'économie de marché. R. Easterlin analysa des entretiens où l'on demandait à des individus s'ils étaient satisfaits de leur vie. Il cherchait en particulier à savoir si ces impressions évoluaient dans le temps, et si oui de quelle façon. Comme on s'en doute, il apparut que les gens riches vont mieux que les pauvres. Toutefois, R. Easterlin constata aussi que ces impressions n'étaient valables qu'à un moment donné. Pendant toute la période étudiée, la satisfaction moyenne n'a pas évolué, même si les revenus ont régulièrement augmenté. Manifestement, les gens pouvaient devenir plus riches sans pour autant apprécier davantage leur vie.

C'est ce phénomène qui est connu aujourd'hui des économistes sous le terme de paradoxe d'Easterlin. Pendant longtemps, les chercheurs se sont peu préoccupés de ce résultat, mais leur approche a évolué. Depuis une quinzaine d'années, la satisfaction subjective dans la vie a été étudiée à la faveur d'entretiens où l'on demande aux personnes interrogées d'évaluer leur satisfaction sur une échelle de bonheur allant de 0 (totalement insatisfait) à 10 (totalement satisfait). En Allemagne, ces études sont conduites dans le cadre d'une grande enquête socio-économique réalisée sur le panel SOEP conçu pour suivre au fil

L'État rend-il heureux ?

Dans leur ouvrage *Le Bonheur. L'approche économique*, Bruno Frey et Claudia Frey-Marti rapportent que les ressortissants des pays globalement démocratiques ont tendance à se déclarer plus satisfaits de leurs vies. Pour ces économistes suisses, c'est certain, les institutions démocratiques augmentent considérablement le bien-être des gens. Une augmentation des droits de participation démocratique d'un point sur une échelle de 10 entraîne le même accroissement de satisfaction dans la vie qu'une augmentation de revenu de 3 500 euros…

1. UNE PETITE PIECE DE MONNAIE trouvée sur une photocopieuse rend heureux celui qui la trouve. Cela a été constaté lors d'une expérience réalisée dans la bibliothèque de l'Université du Michigan. À la sortie de la bibliothèque, les étudiants qui trouvaient une pièce de dix cents de dollar volontairement « oubliée » par les enquêteurs se déclaraient plus satisfaits de leur vie que les autres.

du temps la satisfaction de 20 000 ménages. En France, c'est l'INSEE qui mène ce type d'études. Par exemple, l'enquête « Qualité de vie et bien-être » de 2011 a montré que le niveau moyen de satisfaction subjective dans la vie est de 6,8 sur l'échelle du bonheur, et que 7 pour cent des gens se situent au-dessous de 5.

Si le paradoxe d'Easterlin existe bien, alors il semble qu'il ne puisse avoir qu'une seule explication : notre satisfaction ne dépend pas de notre revenu absolu, mais de notre position relative sur l'échelle des revenus. Mais la moyenne ne varie guère : si la position de quelqu'un sur l'échelle des revenus s'élève, celle d'un autre devra descendre… Cette situation est comparable à ce qui se passe lors d'une course de 100 mètres : que quelqu'un passe, par exemple, de la troisième à la deuxième place, et celui qui était à la deuxième place passera à la troisième, ou pire !

De même, il n'est pas possible que tous soient gagnants dans la compétition pour les hauts revenus, et notre position par rapport à celle des autres est essentielle à notre ressenti. Afin de rendre cette réalité concrète, imaginez que votre responsable hiérarchique vous a convoqué et vous annonce qu'étant donné le caractère remarquable de votre travail, il a décidé de vous attribuer une augmentation de salaire de cinq pour cent *(voir la figure 2)*. Vous sortez très satisfait de l'entretien, mais rencontrez par hasard une collègue qui, remarquant votre visage rayonnant, vous demande naïvement : « Alors, toi aussi tu as une augmentation de dix pour cent ? » Votre gaîté disparaît sur-le-champ et vous avez l'impression d'avoir reçu une douche froide.

Tout est affaire de comparaison

Si l'on suppose vrai le paradoxe d'Easterlin, alors notre esprit comparatif a de grandes conséquences sociales. Quand, dans un groupe, le gain total est limité alors que la compétition fait rage, il serait sensé de la limiter. Dans ce cas, l'État devrait limiter la lutte pour les hauts revenus, ce qui nous libérerait de tant d'aspirations vides de sens et d'une quête hédoniste sans fin, où nous enferme notre égoïsme…

Bref, le paradoxe d'Easterlin pris à la lettre impliquerait que tout ce que les économistes préconisent produirait en fait le contraire de ce qu'ils en espèrent : la compétition serait néfaste et la croissance absurde. Les interventions de l'État dans la vie privée seraient nécessaires et justifiées… pour protéger le bonheur des gens. De quoi donner des sueurs froides aux libéraux – qui sont par principe opposés aux interventions de l'État – et, plus généralement, à la plupart des économistes !

Nous voyons que le mérite incontestable de la recherche sur le bien-être amorcée par R. Easterlin est surtout d'avoir attiré l'attention sur la signification des positions sociales et économiques relatives de chacun dans la société. Toutefois, les données sur la satisfaction dans la vie à partir desquelles il a travaillé suffisent-elles à tirer les conclusions auxquelles son paradoxe nous convie ? Il est possible que non ! Au cours des cinq dernières années, plusieurs études ont remis le paradoxe d'Easterlin en question.

Que notre position relative dans la société ait des conséquences notables est incontestable. En 2007, Luis Rayo, de l'Université de l'Utah, et Gary Becker, de l'Université de Chicago, ont constaté que nous choisissons toujours des références qui nous sont proches dans le temps et dans l'espace. Cela s'explique par deux caractéristiques de notre cerveau : nous sommes incapables de percevoir les augmentations de bonheur qui sont trop petites… mais aussi celles qui sont trop grandes.

Ces limites de notre perception du bonheur impliquent que nous ne pouvons nous mouvoir à volonté vers le haut ou vers le bas sur l'échelle des émotions. Au lieu de cela, nous nous orientons par approximations, d'après des références qui nous permettent d'estimer à peu près notre niveau de bonheur. Il peut s'agir des revenus de collègues ou de voisins, mais aussi de notre revenu de l'année précédente. L. Rayo et G. Becker avancent qu'au cours de l'évolution, il a toujours été important pour les membres de notre espèce de savoir estimer à la fois leurs contributions à la vie du groupe, mais aussi leur position relative au sein de ce groupe. Un chasseur qui ramène moins de gibier que les autres commet certainement des erreurs systématiques. Afin de s'en apercevoir, il doit comparer ses performances à celles des autres.

Pour autant, la comparaison avec les autres ne saurait être notre seul critère de bonheur. Nos yeux s'adaptent à l'intense

© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013

umière du jour, mais dès que nous pénétrons dans une caverne, ils s'adaptent à une autre échelle de luminosité. Dans les deux cas, nous saurons dire s'il « fait sombre » ou s'il « fait clair ». Pourquoi en serait-il autrement avec notre perception du bonheur ?

Dès lors, que penser du paradoxe d'Easterlin ? Qu'est-ce qui s'oppose à l'idée qu'il soit rigoureusement applicable comme le préconisent beaucoup de gens ? En fait, il existe déjà un premier doute concernant la validité des données rassemblées en demandant à des individus d'estimer leur satisfaction subjective dans la vie sur une échelle de 1 à 10. De telles données, qui constituent toujours la base de la recherche sur le bien-être, représentent-elles correctement la satisfaction des sujets interrogés ? Manifestement non.

De fait, les données produites quand on demande à des sujets d'estimer leur satisfaction dans la vie sur l'échelle du bonheur (de 0 à 10) ne semblent guère fiables. Par exemple, en interrogeant les mêmes personnes une seconde fois, les chercheurs ont testé s'ils obtenaient les mêmes résultats. La réponse est non : certes, les résultats des deux enquêtes sont corrélés, mais avec un coefficient de corrélation égal à 0,5, ce qui est faible (des réponses identiques donneraient 1).

En outre, on a constaté que les réponses concernant la satisfaction subjective dans la vie sont influencées par des détails qui ne devraient pas jouer de rôle, comme le temps qu'il fait… Lors d'une expérience conduite en 1987 à l'Université du Michigan, le psychologue social allemand Norbert Schwarz a mis en évidence le rôle des conditions extérieures. Une pièce de dix cents fut placée dans la photocopieuse d'une bibliothèque universitaire, comme si le dernier usager de l'appareil l'avait oubliée : tous les étudiants qui la trouvèrent l'empochèrent. À leur sortie de la bibliothèque, on leur demanda de participer à une enquête sur leur satisfaction dans la vie. Les étudiants enrichis par la pièce empochée se déclarèrent nettement plus satisfaits que les membres du groupe de contrôle. Ainsi, dix cents suffisent à influencer l'humeur d'un étudiant !

Cela signifie-t-il que nous ne pouvons pas nous fier aux données concernant la

Le paradoxe du malheur français

La France est l'une des surprises réservées par l'économie du bonheur : on y est plus malheureux qu'ailleurs… par culture.

Le niveau de vie des habitants d'un pays est lié à leur bien-être déclaré. Ainsi, pour un niveau de revenu par personne, ou pour un indice de développement humain donné (l'IDH, qui combine le revenu par individu, l'espérance de vie et le niveau d'éducation), on peut prédire le niveau moyen de bonheur de la population d'un pays. On peut même représenter cette relation par une courbe *(ci-contre)*. Mais au-delà de cette relation moyenne, on constate des écarts étonnants.

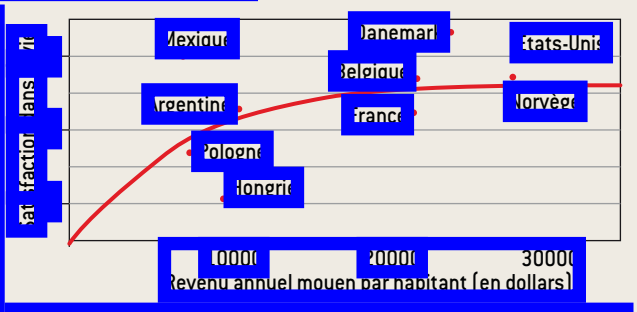
Certains pays se trouvent systématiquement au-dessus de la courbe : c'est le cas des pays d'Amérique latine, dont les habitants semblent détenir le secret d'un bonheur qui magnifie leurs conditions de vie. Les pays du Nord de l'Europe (Norvège, Suède, Danemark) sont eux aussi au-dessus de la courbe. À l'inverse, les habitants des pays anciennement socialistes sont nettement moins heureux que ne le prédirait leur niveau de vie.

Qu'en est-il de la France ? Étonnamment, les Français sont bien au-dessous du niveau de bonheur que prédirait leur niveau de vie. Sur une échelle de bonheur graduée de 0 à 10, ils se placent en moyenne à 7,2 ; pourtant, étant donné leur IDH, ils devraient connaître un niveau de bonheur moyen de 7,6. Ils perdent donc inexplicablement environ un demi-échelon sur l'échelle de bonheur et se situent dans la queue du classement des pays d'Europe occidentale, bien au-dessous de la moyenne européenne. Avec un IDH identique à la France, la moyenne de la Belgique se situe à 7,7 et le Danemark à 8,3. Au total, le fait d'être Français réduit de 20 pour cent la probabilité de se déclarer très heureux, c'est-à-dire au-delà du septième échelon (8 et plus).

Ainsi, tout se passe comme s'il y avait une sorte de « perte en ligne » du bonheur en France, une dissipation du bonheur normalement produit par les conditions de vie objectives.

Notons que depuis que les données sont disponibles, c'est-à-dire depuis les années 1970, le classement relatif des pays est stable, et la position défavorable de la France aussi. Il ne s'agit pas d'un effet de conjoncture.

Ce relatif défaut de bonheur français se traduit par la consommation élevée d'antidépresseurs. Il s'illustre également par des scores élevés de désordres psychiques et de détresse mentale. Et les mesures plus émotionnelles du bien-être, recueillies dans l'enquête mondiale réalisée par l'entreprise *Gallup*, conduisent au même résultat : les Français obtiennent un score très faible en matière d'émotions positives ressenties au cours de la semaine qui a précédé l'enquête (joie, enthousiasme, détente, sourire) et un score très élevé en matière d'émotions négatives (anxiété, stress, tristesse, colère), contrairement à la Grande-Bretagne, à la Suède et aux Pays-Bas par exemple, qui se situent en haut du classement.



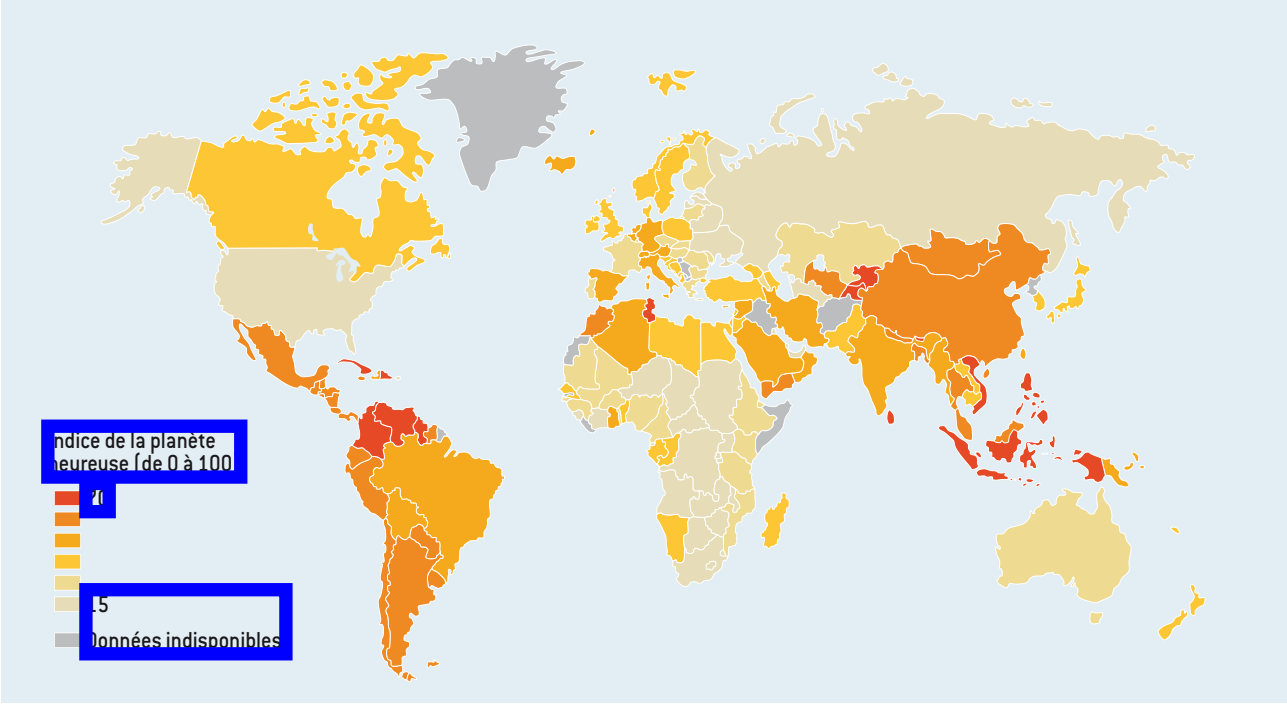
LE BIEN-ÊTRE est relié au niveau de vie *(courbe rouge)*. Mais dans certains pays, notamment en France, il est anormalement faible.

Le « malheur français » ne s'étend pourtant pas aux immigrés. Certes, les immigrés sont toujours moins heureux que les « natifs » d'un pays donné. Mais au-delà de l'effet du déracinement, si l'on considère deux immigrés issus du même pays dont l'un choisit de s'établir en France et l'autre aux Pays-Bas, le premier ne sera pas moins heureux que le second.

Cela montre que le moindre bonheur des Français ne peut pas être attribué uniquement aux circonstances objectives de leur vie, mais doit aussi être rapporté à la façon dont les Français transforment leurs expériences en bonheur ressenti. En systématisant cette analyse des différences entre population immigrée et non immigrée au sein d'un échantillon de pays européens (*European Social Survey*, 2002-2010), on vérifie que la plus grande partie de cette perte en ligne de bonheur est liée à la « mentalité » et à la « culture » françaises. On constate aussi que les Français vivant à l'étranger sont moins heureux que d'autres Européens vivant hors de leur pays d'origine. Enfin, les immigrés ayant été scolarisés en France dans leur prime enfance (avant l'âge de dix ans) se déclarent moins heureux que ceux qui ne l'ont pas été.

Généralement, le niveau de bien-être déclaré par les émigrés européens est lié au niveau moyen de leurs compatriotes restés au pays, une preuve de la dimension culturelle du bien-être. Une piste de recherche à creuser…

Claudia Senik
École d'économie de Paris
et Université Paris-Sorbonne



2. L'INDICE DE LA PLANÈTE HEUREUSE, en anglais *Happy planet index*, HPI, est un indicateur économique créé par la Fondation britannique pour une nouvelle économie *(New Economics Foundation)* permettant de classer les pays d'après trois critères : l'empreinte écologique, l'espérance de vie et le bonheur ressenti des populations. En 2009, la France occupait la 71e place sur 143 pays classés. Quand on compare la carte mondiale de cet indice *(ci-dessus)* et celle des produits intérieurs bruts (PIB) des différents pays, on constate que les deux cartes ne sont pas superposables : le bonheur n'est pas lié au PIB.

LES AUTEURS

Joachim WEIMANN est professeur d'économie politique à l'Université Otto von Guericke à Magdebourg, en Allemagne.

Ronnie SCHÖB est professeur de gestion financière à l'Université libre de Berlin.

Andreas KNABE est professeur de gestion financière à l'Université Otto von Guericke

satisfaction que chacun exprime face à sa vie ? Pas forcément. Le hasard joue certainement un rôle dans les résultats obtenus, mais pas au point de produire un biais systématique dans les différentes enquêtes. En fait, on peut s'attendre à ce que le grand nombre des enquêtes finisse par moyenner les diverses influences auxquelles elles ont pu être soumises. Les études fondées sur l'interrogation rigoureusement menée de grandes cohortes sont donc protégées contre les biais systématiques.

Par ailleurs, on doit se poser la question de savoir s'il suffit d'interroger quelqu'un sur sa satisfaction subjective dans la vie une seule fois. Pouvons-nous exprimer notre niveau de satisfaction en ne répondant qu'à une seule question ? Si nous le faisons, ne perdons-nous pas une partie essentielle de l'information ? Si l'on se contente d'une unique réponse, on néglige le rôle du temps qui passe ainsi que le caractère pluridimensionnel de la satisfaction dans la vie.

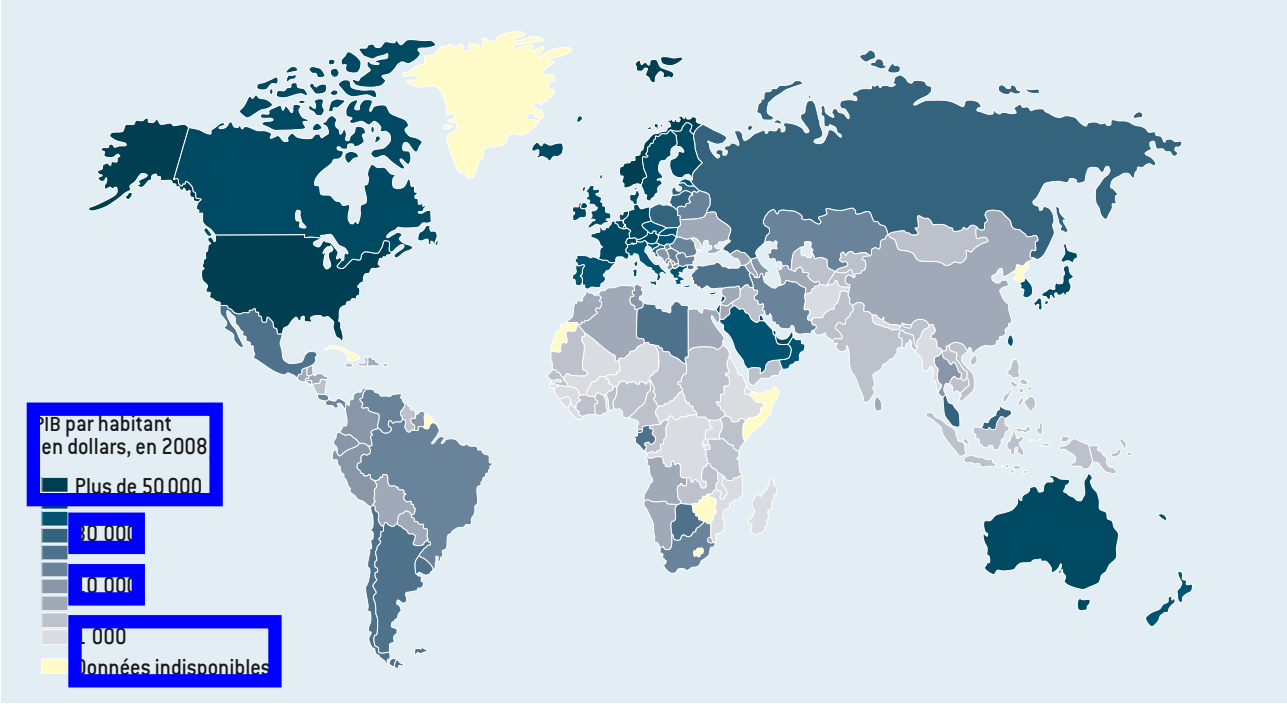
Les données sur la satisfaction subjective sont comme des clichés pris à des instants précis. En réalité, elles résultent d'un courant continu de perceptions différentes. Dès lors, l'âge de l'individu doit influencer ses réponses en matière de perception du bonheur. Aujourd'hui, certains invoquent le paradoxe d'Easterlin pour justifier qu'il est vain de courir après la croissance et des revenus plus élevés pour augmenter son niveau de bonheur. Il est pourtant indiscutable que seule la croissance a rendu possible l'augmentation constante de l'espérance de vie dans les pays développés, en dégageant des ressources pour l'amélioration de la recherche médicale, du système de santé, de l'alimentation et de l'hygiène.

Vie plus longue, donc bonheur plus long ?

L'équation « plus de revenu = plus de santé » semble vraie, que ce soit au sein d'une société ou quand on compare des sociétés différentes. Même si la croissance économique n'avait pas d'effets positifs, son seul effet sur la durée de vie en bonne santé suffirait à rendre les gens heureux plus longtemps, à condition toutefois que la durée de vie gagnée soit à peu près aussi heureuse que la durée de vie passée. C'est précisément l'un des résultats que le sociologue Ruut Veenhoven, de l'Université Erasmus à Rotterdam, et l'économiste Michael Hagerty, de l'Université de Californie à Davis, ont obtenus en 2006 en étudiant ce qu'ils ont nommé les années de vie heureuse.

Un autre argument est souvent opposé au paradoxe d'Easterlin : il n'est guère raisonnable de comparer des indices de satis-

© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013



action exprimés à des moments différents de sa vie, même s'ils sont exprimés par une même personne. En effet, le sens que l'on donne à l'échelle du bonheur (de 0 à 10) change avec le temps. D'après la théorie de L. Rayo et G. Becker déjà mentionnée, nous devons nous repérer d'après des valeurs de référence proches de nous dans le temps et dans l'espace. Or ces repères changent progressivement au fil du temps, par exemple parce que nos revenus augmentent.

Supposons que l'on demande à une jeune personne si elle est satisfaite de sa vie. Pour répondre, il faudra qu'elle s'imagine comment serait sa vie si elle était « parfaitement satisfaite », c'est-à-dire si elle pouvait indiquer 10 sur l'échelle du bonheur. Toutefois, si l'on interroge cette personne dix ans plus tard, et même si elle a entre-temps atteint ses objectifs, il est peu probable qu'elle attribue l'indice 10 à sa situation, car ses références auront changé. C'est pourquoi nous ne pouvons guère être sûrs de ce que signifie le choix d'une même note dans deux entretiens différents.

Le deuxième aspect qui a été négligé dans les études passées est que la recherche sur le bonheur s'est concentrée seulement sur la production d'un chiffre d'appréciation, ce qui fait l'impasse sur les différentes dimensions de la perception du bonheur. Dans les protocoles usuels d'autoévaluation de leur satisfaction, on demande aux personnes interrogées de réaliser une estimation cognitive de leur vie. Pour donner une note sur l'échelle proposée, il leur faut estimer plusieurs aspects de leur vie et leur attribuer un poids. Que vaut mon travail ? Comment est-ce que cela se passe dans ma famille, dans mon couple ? Suis-je satisfaite de ma santé ? Répondre à ces questions exige de réfléchir attentivement, afin de donner une estimation globale de sa satisfaction.

LA SATISFACTION COGNITIVE est notablement plus basse chez les chômeurs. Nous avons eu la surprise de constater que ce n'est pas vrai quand il s'agit du bilan affectif.

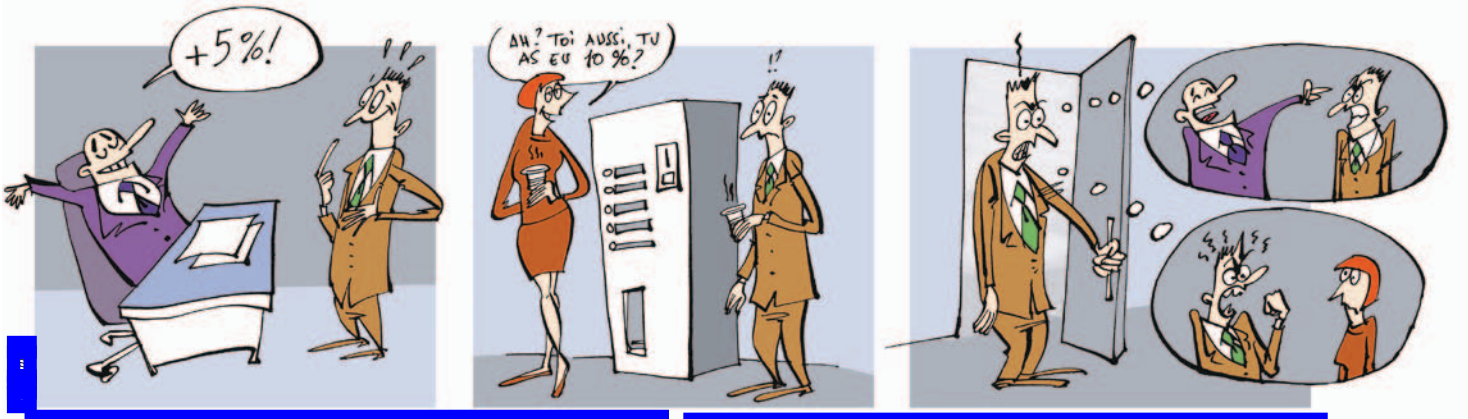
Cette évaluation réfléchie, ou encore cognitive, se différencie notablement du bonheur affectif. Dans cette dernière évaluation, il ne s'agit que d'émotions, lesquelles sont pour l'essentiel traitées de façon non consciente. Le sentiment gratifiant que nous avons quand nous prenons nos enfants dans les bras ou quand quelqu'un que nous apprécions nous sourit n'a rien à voir avec une appréciation abstraite de la valeur de notre vie.

Les perceptions affectives du bonheur et du malheur peuvent être aussi bien mesurées que la satisfaction cognitive. Deux découvertes sont significatives à cet égard. Tout d'abord, le bonheur cognitif et le bonheur affectif ne sont pas liés et peuvent même être opposés.

C'est ce que prouve l'étude que nous avons réalisée avec un collègue de l'Université de Magdebourg en 2010. Nous y avons examiné non seulement la satisfaction dans la vie, mais aussi ce que nous nommons le « bilan affectif » de chômeurs et d'employés. Nous désignons ainsi la moyenne obtenue quand on fait le bilan des émotions positives et des émotions négatives ressenties par un individu au cours d'une journée.

En ce qui concerne la satisfaction cognitive, ce que de nombreuses études antérieures avaient montré (et qui n'est guère surprenant) a été confirmé : elle est notablement plus basse chez les chômeurs que chez les gens qui ont un emploi. Toutefois, nous avons eu la surprise de constater que ce n'est pas vrai quand il s'agit du bilan affectif. D'un point de vue émotionnel, un chômeur est aussi satisfait que quelqu'un qui travaille.

Une autre étude que nous avons réalisée en 2012 est encore plus surprenante : elle a révélé que les chômeurs mariés dont



3. NOUS ESTIMONS NOTRE BONHEUR SUBJECTIF d'après des références choisies dans notre environnement. Nous sommes ravis d'une augmentation de cinq pour cent *(a)*, mais si une collègue fait un bond impair en révélant qu'elle a eu dix pour cent d'augmentation *(b)*, non seulement le bonheur initial disparaît, mais nous en voulons alors à la Terre entière *(c)*. Le bonheur subjectif dépend des circonstances.

a femme travaille sont ceux qui souffrent e plus de leur situation, du moins si l'on se fie à leur estimation cognitive. Car, dans e même temps, les membres de ce groupe présentaient le plus fort bilan affectif, c'est-à-dire le plus d'émotions positives !

De nouvelles données recueillies pour évaluer simultanément la satisfaction cognitive et les émotions montrent qu'il y a un lien fort entre le revenu et la satisfaction cognitive. Elles prouvent aussi qu'un lien moins fort existe entre le revenu et le bonheur affectif. Dès lors, on peut se demander si le paradoxe d'Easterlin n'est pas invalidé au moins dans la dimension cognitive du bonheur. Dans ces conditions, les mesures politiques fondées sur le paradoxe sont-elles encore justifiées ? Quoi qu'il en soit, prenons garde à ne pas interpréter de façon inappropriée les résultats : un chômeur peut avoir un bonheur affectif comparable à celui d'une personne ayant un emploi, sans que cela ne justifie en rien ses mauvaises conditions de vie.

Un autre argument contre la validité du paradoxe d'Easterlin tient à ce que les données de l'étude *World Value Surveys* dont il est issu semblent aujourd'hui entachées de divers biais méthodologiques. Il est en effet avéré que ces données ont été traitées par des méthodes différentes selon les pays, et elles ne sauraient donc être comparées d'un pays à l'autre. C'est pourquoi la recherche récente sur le bien-être s'appuie surtout sur une autre base de données, le *Gallup World Poll*, qui passe pour être plus homogène et plus fiable sur le plan méthodologique.

Les économistes américains Betsey Stevenson et Justin Wolfers, de l'Université du Michigan, ont beaucoup travaillé sur les données issues des plus grands pays et en ont corrigé les biais méthodologiques les plus importants. Si l'on utilise leurs données corrigées, on constate que le paradoxe d'Easterlin disparaît dans presque tous les pays. À la place apparaît un lien clair entre le revenu absolu et le niveau moyen de bonheur.

La fin du paradoxe d'Easterlin ?

Les États-Unis représentent toutefois une remarquable exception. C'est surtout dans ce pays que les gens plus riches sont le moins satisfaits de leur vie. Cela pourrait s'expliquer par le fait que les salaires y ont certes augmenté, mais les inégalités de revenus aussi. Dans la mesure où ce sont les positions relatives qui comptent, il se pourrait que l'effet associé à la hausse des salaires ait été gommé par l'effet lié à l'augmentation des inégalités. Le fait que la satisfaction moyenne soit restée constante aux États-Unis ne peut donc pas être considéré comme un argument en faveur de l'idée selon laquelle l'argent ne fait pas le bonheur.

Dans l'ensemble, les recherches sur le bonheur ne sauraient indiquer de façon indiscutable les décisions politiques à prendre. Pour autant, cela ne signifie pas que leurs résultats soient sans intérêt, car ils permettent de préciser notre appréciation du bonheur. Et comme les résultats obtenus sur les liens entre bien-être et aisance matérielle ne sont pas encore bien établis, ces recherches conservent tout leur intérêt. ■

BIBLIOGRAPHIE

B. Frey et C. Frey Marti, **Le bonheur. L'approche économique,** Presses polytechniques et universitaires romandes, 2013.

Le bonheur, *L'Essentiel Cerveau & Psycho*, mai-juillet 2013.

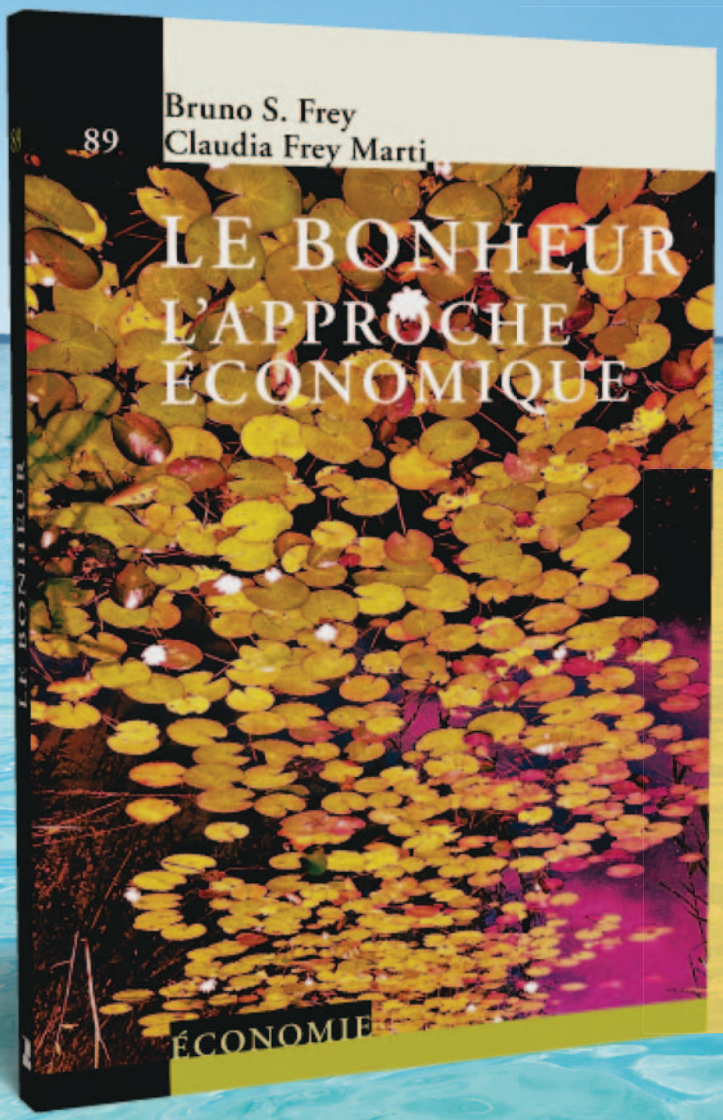
C. Senik, **The French unhappiness puzzle : The cultural dimension of happiness,** École économique de Paris, rapport n° 2011-34, 2011.

A. Knabe *et al.*, **Dissatisfied with life, but having a good day : Time-use and well-being of the nnemployed,** *The Economic Journal*, vol. 120, pp. 867-889, 2010.

R. Easterlin, **Does economic growth improve the human lot ? Some empirical evidence,** dans *Nations and Households in Economic Growth*, Academic Press, 1974.

© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013

le bonheur, à quel prix ?



Quelle est la recette du bonheur ?

Dépend-il de notre revenu, de notre position sociale, de notre relation aux loisirs, de notre statut civil ? Ou d'autres facteurs encore ? Pour la première fois, des économistes se penchent sur ces questions, et y répondent dans un petit ouvrage surprenant, clair et sans jargon.

Bruno S. Frey, Claudia Frey Marti
Le bonheur, l'approche économique
13,50 €, 152 pages, 978-2-88915-010-6
Disponible en librairie fin mai 2013

PRESSES POLYTECHNIQUES ET UNIVERSITAIRES ROMANDES
Editeur scientifique de référence depuis 1980
www.ppur.com

HISTOIRE DES SCIENCES

Les pionniers oubliés de la TSF

Des débuts de la TSF, la transmission sans fil, au tournant du XX^e siècle, on connaît surtout les grandes étapes et les découvreurs associés. Mais son histoire est bien plus qu'une simple chronologie linéaire d'inventions.

Jean-Jacques LEDOS

L'histoire ne retient, le plus souvent, qu'une sélection d'événements et d'acteurs dont on dirait, de nos jours, qu'ils ont été mieux médiatisés. Le récit des débuts de la transmission sans fil, la TSF, des années 1880 jusqu'à l'avènement de la radiodiffusion dans les années 1920, est ainsi devenu une succession de noms célèbres – Faraday, Maxwell, Hertz, Branly, Popov, Marconi et quelques autres – et de découvertes associées. Pourtant, plusieurs autres initiatives, oubliées ou méconnues, ont contribué à l'édifice. Et c'est peut-être dans ces zones peu éclairées de l'histoire que l'on perçoit le mieux le plaisir de la découverte.

L'histoire officielle, la voici. Entre 1865 et 1873, s'inspirant des idées du physicien britannique Michael Faraday (1791-1867), l'Écossais James Clerk Maxwell pose les bases de l'électromagnétisme. Selon sa théorie, la lumière se propage dans l'air sous la forme d'ondes électromagnétiques. Quatorze ans plus tard, souhaitant vérifier la validité de cette théorie, le physicien allemand Heinrich Hertz observe que la production d'un arc électrique entre deux sphères de laiton parcourues par un courant électrique entraîne l'éclatement d'une étincelle aux bornes d'un générateur placé à faible distance, sans fil.

Les expériences de Hertz constituent la première manifestation de l'émission d'ondes électromagnétiques à distance, dont il étudie les propriétés jusqu'à sa mort, en 1894. Hertz ne pensait pas qu'un tel dispositif puisse être utilisé pour transmettre des messages dans l'espace. Certains, ensuite, ont reproduit son expérience et en ont évalué l'avenir possible, tel le Britannique William Crookes qui supposait, en 1892, qu'un tel phénomène pourrait un jour servir à transmettre des messages.

De Hertz à la première radioémission

En 1890, le physicien français Édouard Branly n'avait pas le souci de « recevoir » des ondes, encore moins d'en émettre. Il reproduit, dans son laboratoire de l'Institut catholique de Paris, l'observation d'un discret physicien italien, Temistocle Calzecchi-Onesti, qui a constaté l'agrégation d'une masse de limaille métallique contenue dans un tube lorsqu'elle est traversée par un courant électrique. Branly observe le même phénomène, sans liaison par fil, lorsqu'une étincelle éclate, à une faible distance, aux bornes d'un générateur. Il désigne le dispositif comme radioconducteur.

La radioconduction se révèle un moyen de mettre en évidence les ébranlements électromagnétiques. Le professeur de physique d'une école navale russe, Alexandre Popov, l'utilise en 1895 pour détecter les orages qui éclatent au loin. Il améliore le dispositif au moyen d'un fil tendu ou d'une tige dressée à côté du radioconducteur : ce sera l'antenne.

En Angleterre, un physicien à la réputation déjà établie, Oliver Lodge, étend l'expérience de Branly en montrant que le tube à limaille (qu'il nomme *coherer*) permet aussi de détecter les ébranlements oscillatoires qu'il a produits avec un éclateur sur le modèle du dispositif de Hertz. Il offre en 1894, à l'auditoire de la Société royale de Londres, une première démonstration de messages codés en morse transmis à distance.

À l'Université de Bologne, Guglielmo Marconi, un jeune homme de bonne famille, observe les expériences semblables reproduites par un professeur ami de la famille, Augusto Righi. Le brevet qu'il dépose en Angleterre en juin 1896 rend hommage à Branly et à Righi. Il comprend rapidement l'usage que l'on peut tirer de ce système technique pour transmettre des messages, codés au rythme de la production d'étincelles. C'est à ce titre que Marconi peut être considéré comme un pionnier de la radiocommunication. Il ne tarde pas à s'investir dans cette activité : en 1897, il crée la *Wireless Telegraph and Signal Company*, première pierre d'un empire industriel.

À l'aube du nouveau siècle, Marconi se laisse toutefois surprendre par un nouvel usage des ondes : la transmission des sons que réussit, en 1906, un Canadien, Reginald Fessenden, affecté au développement des alternateurs (générateurs de courant non continu) dans une filiale de la *Westinghouse Electric Company*. Pour répondre à la demande du Bureau de météorologie américain, il en étend l'application à l'émission d'ondes entretenues à très haute fréquence (pour l'époque) : 100 kilohertz. Dans la nuit de Noël 1906, il parle, chante et joue du violon devant un microphone inséré entre l'alternateur et l'antenne. Plusieurs opérateurs de

adiotélégraphie ont affirmé avoir entendu dans les écouteurs, à bord de leur navire dans l'Atlantique, avec surprise sinon effarement, des paroles et de la musique.

On ne peut pas encore parler de modulation de signal, au sens moderne du terme, tout au plus d'une transmission contrôlée d'ondes entretenues produites par un alternateur ; mais deux ans plus tôt, une invention de l'Américain Lee De Forest, la triode, a ouvert la voie à l'amplification et à la modulation des ondes, et amélioré la détection du signal émis.

La triode est une version améliorée de la diode à vide, un tube électronique élaboré deux ans plus tôt par le physicien anglais John Fleming pour le compte de la compagnie de Marconi. Fondée sur l'effet Edison – l'apparition unilatérale d'un courant électrique entre un filament chauffé (par un courant) et une plaque métallique –, la diode à vide est utilisée par Fleming comme détecteur d'ondes. Pour améliorer le dispositif, De Forest insère entre le filament et la plaque une grille métallique sous tension. Il observe alors que la tension récupérée en sortie, sur la plaque, est amplifiée par rapport à celle appliquée à la grille. Grâce à l'amplificateur ainsi obtenu, la téléphonie sans fil, c'est-à-dire la diffusion par voie hertzienne de sons de hauteur, de timbre et d'intensité variables, devient possible. D'autres chercheurs découvriront plus tard la propriété modulatrice du tube à trois (et bientôt davantage) électrodes. Cette fonction est à l'origine de la diffusion moderne par les émetteurs de radio et de télévision.

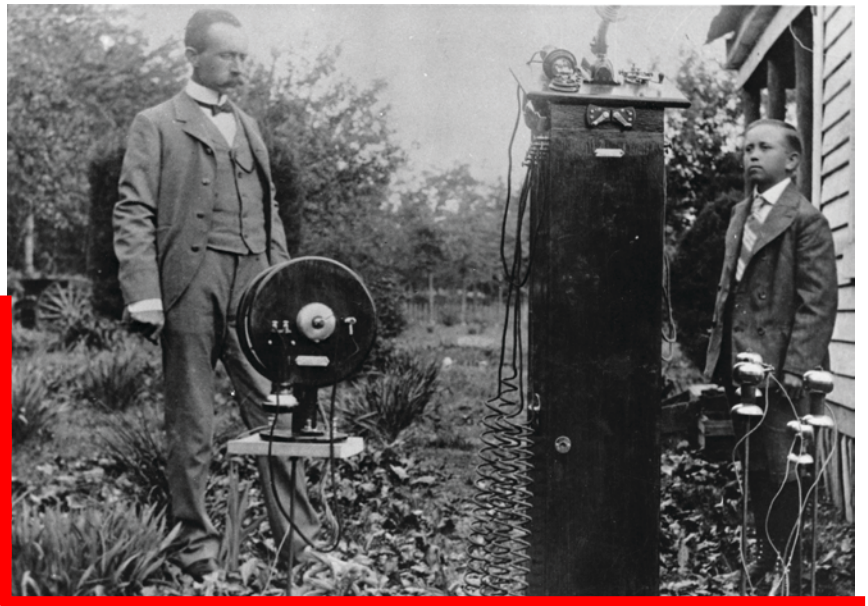
En 1908, en voyage à Paris, De Forest obtient l'autorisation d'utiliser la tour Eiffel pour diffuser la musique d'un disque, que l'industriel français Eugène Ducretet reçoit dans son atelier de la rue Claude Bernard. Une quinzaine d'années plus tard, en 1922, sont diffusés les premiers programmes annoncés et réguliers depuis un émetteur fonctionnant

L'AUTEUR

Jean-Jacques LEDOS a été chef-opérateur de prise de vues à la RTF, à l'ORTF et à la Société française de production. Il a publié de nombreux articles et divers ouvrages consacrés à l'histoire de la radio et de la télévision.

1. JAMES A. COLES, un opérateur radio amateur, utilisant vers 1914 la station de transmission sans fil qu'il a construite chez lui, à Minneapolis aux États-Unis. Deux ans plus tôt, le Congrès américain avait voté le *Radio Act*, selon lequel tout opérateur radio doit obtenir une licence pour émettre, mais, en 1914, la plupart des stations restaient non déclarées, devenant les premières radios américaines pirates.

© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013



2. L'INGENIEUR AMERICAIN NATHAN STUBBLEFIELD présente avec son fils, dans leur jardin vers 1900, son dispositif expérimental de transmission sans fil. Celui-ci fonctionnait toutefois encore par induction et non par émission.

sur une fréquence autorisée et identifiée par un indicatif de station : la radiodiffusion est née.

Occasions manquées

Ainsi officialisée, l'histoire a laissé dans l'ombre un certain nombre d'événements discrets, des expériences oubliées ou des occasions manquées parce que les inventeurs n'ont pas perçu l'usage futur de leur découverte ou parce qu'ils n'ont pas su convaincre les décideurs.

Vers 1860, par exemple, un dentiste de Washington, Mahlon Loomis, imaginait de capter l'énergie qu'il devinait dans les aurores boréales. Mais l'observation qui a le plus sûrement guidé la recherche des savants, sensibilisés à la notion d'action à distance par les travaux de Faraday et de Maxwell, est le claquement sec qui accompagne la production d'étincelles aux bornes d'un condensateur. Un tel dispositif, constitué de deux plaques conductrices séparées par un matériau isolant, était connu dès le XVIII[e] siècle sous le nom de bouteille de Leyde (une bouteille en verre recouverte, sur les deux faces, de feuilles métalliques). Dès 1871, un jeune professeur de Philadelphie, Elihu Thomson, recueille à quelque distance mais sans fil, des étincelles d'une bobine d'induction de Ruhmkorff, un générateur permettant d'obtenir des tensions élevées (une bobine parcourue par un courant de faible tension induit, par les ondes électromagnétiques engendrées, un courant de tension élevée dans une autre bobine). Avec l'aide de son collègue Edwin Houston, il améliore le dispositif, mais sans en percevoir l'utilisation comme moyen de communication. La réussite de Thomson et Houston éclatera dans un autre domaine, l'industrie électrique, avec notamment l'invention de la lampe à arc électrique.

Quelques années plus tard, l'inventeur du microphone, David Hughes, se livre à des expériences similaires. Il réussit à recevoir sur plusieurs dizaines de mètres, dans un écouteur téléphonique de son invention, le bruit de l'éclatement d'étincelles.

En 1886, le supplément du magazine *Scientific American* rend compte, dans son numéro du 11 décembre, d'expériences de même nature, menées depuis plusieurs années par Amos Dolbear. Ce professeur de physique de Boston, informé du crépitement produit entre les lames d'un condensateur, imagine étendre le phénomène en imposant à l'une des plaques du condensateur des tensions produites par une bobine d'induction que la deuxième plaque pourrait reproduire. Ses expériences restent toutefois sans suite, malgré une démonstration réalisée devant une assemblée d'ingénieurs anglais en 1882.

Et selon un témoignage imprécis, dès 1892, un Américain, Nathan Stubblefield, transmettait, à distance et sans fil, des conversations échangées entre deux téléphones. Il s'agissait toutefois d'un phénomène d'induction et non de la transmission par émetteur qui sera retenue par la suite. Cet amateur, que son épitaphe désigne comme père de la radio, déposa tardivement, en 1908, un brevet pour une technique déjà entrée en exploitation... depuis 20 ans.

En 1892 aussi, au Brésil, le prêtre jésuite Roberto Landell de Moura effectuait une démonstration similaire devant une assistance subjuguée, croyant entendre la voix du diable. Mais la science avait déjà imposé des résultats dont l'avenir a confirmé la validité.

À la suite des premières émissions de messages parlés, nombre d'initiatives ont contribué à l'avènement de la radiodiffusion. À San Jose, près de San Francisco en Californie, un professeur d'enseignement technique, Charles « Doc » Herrold, diffuse tous les mercredis, à partir de 1909, des essais de radiophonie, que ses élèves reçoivent sur un détecteur à galène (un cristal semi-conducteur de sulfure de plomb). Le 13 janvier 1910, des extraits de *Cavalleria Rusticana*, de Leoncavallo et de *Paillasse*, de Mascagni, chantés sur la scène du *Metropolitan Opera* de New York par Enrico Caruso et Emmy Destinn, sont diffusés par De Forest et reçus à Newark, à quelques kilomètres. En mars 1914, Robert Goldschmidt, physicien belge, en collaboration avec l'ingénieur français Raymond Braillard, entreprend, à la demande du roi Albert I[er] de Belgique, des essais à partir d'un émetteur expérimental installé dans une annexe du palais de Laeken, à Bruxelles. Des concerts sont diffusés chaque samedi et reçus sur des récepteurs à galène. C'est la première diffusion radiophonique en Europe. La déclaration de guerre, en août, y mettra fin.

Aux Pays-Bas, un ingénieur de 34 ans, Hanso Schotanus à Steringa Idzerda, se passionne pour la TSF depuis sa sortie de l'université. En mars 1919, à la Foire d'Utrecht, il se livre à des essais de transmission avec

© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013

un émetteur à lampes qu'il a construit et, parallèlement, engage la procédure réglementaire au terme de laquelle il obtient, en août suivant, au nom de la *Nederlandse Radio-Industrie*, l'autorisation d'émettre de La Haye. La première émission régulière est annoncée le 5 novembre par le quotidien *De Nieuwe Rotterdamsche Courant* et le périodique *Radio News*. Idzerda présente lui-même le titre des extraits musicaux qui constituent le programme, mais l'expérience s'arrête au bout de cinq ans, faute de soutien financier.

De la radiotéléphonie à la radiodiffusion

Des essais similaires ont lieu aux États-Unis. Le 31 août 1920, un article du *Detroit News* invite les opérateurs radio de la région de Madison, dans le Wisconsin – ils sont une petite centaine –, à écouter, à partir de 20 h, la station 8MK qui diffusera diverses informations et de la musique phonographique. Quelques initiatives sont signalées en d'autres États, mais ces émissions de téléphonie sans fil ne sont ni régulières ni annoncées. Le 2 novembre, une autre station, KDKA, installée par la *Westinghouse Electric and Manufacturing Company* à Pittsburgh, réussit un scoop : transmettre avant la presse l'élection de Warren Harding à la présidence des États-Unis. Dès le lendemain, la station émet régulièrement une heure par jour, de 20h30 à 21h30. En 1923, on dénombre aux États-Unis environ 600 émetteurs captés par près de 100 000 récepteurs.

En Grande-Bretagne, Marconi, toujours distancé, lance pendant deux semaines, à partir de l'émetteur de Chelmsford, avec une puissance de 15 kilowatts et sur une longueur d'onde de 2 800 mètres, un programme expérimental quotidien. Des programmes réguliers commencent en février 1922 sous l'indicatif 2MT. La *British Broadcasting Company* (BBC) est créée en mai, à l'initiative d'une association de constructeurs de matériel électrique.

En France, Émile Girardeau, fondateur en 1910 de la Société française radioélectrique (SFR), a observé à partir de 1919, aux États-Unis, les encouragements que l'entourage du président Wilson prodigue à la nouvelle activité de communication. Il tente d'obtenir les mêmes facilités du gouvernement français. Des débats politiques difficiles limiteront l'ambition de la SFR à l'installation, en novembre 1922, de la première station de radiodiffusion française, Radiola, qui deviendra plus tard Radio Paris. L'État, soucieux de maintenir sa présence dans le domaine réglementé de la communication, est partagé entre l'attrait de la modernité et le vertige que suscite la liberté de communiquer. Sous les ordres du général Ferrié, l'émetteur de radiotélégraphie militaire de la tour Eiffel, converti en 1921 à la radiotéléphonie, diffuse, sur la longueur d'onde de 2 600 mètres, des signaux horaires et des bulletins météorologiques lus. La filiale française *Le matériel téléphonique* du groupe américain *Western Electric*, qui a vainement tenté de trouver sa place dans la course à l'expression radiophonique, remet son matériel d'émission à l'École supérieure des PTT installée rue de Grenelle. C'est l'origine de la station Paris PTT, point de départ du réseau de la radiodiffusion nationale.

L'Allemagne, dans une conjoncture difficile au lendemain du Traité de Versailles, ouvre une première station, à Berlin, en 1923.

L'histoire des techniques est riche d'inventeurs plus passionnés par la joie de la découverte que par l'exploitation de leurs résultats. Ces démarches désintéressées n'ont pas manqué d'être exploitées par d'autres, plus déterminés et plus réalistes, qui ont deviné l'avenir au-delà de la découverte. Comme le cinéma ou la télévision, la TSF n'a été perçue, à l'origine, que comme une curiosité de laboratoire. À Crookes qui lui prédisait, en 1888, que les ondes feraient un jour le tour du monde, Hertz avait répondu qu'elles avaient peu de chances de dépasser un kilomètre... ■

BIBLIOGRAPHIE

J.-J. Ledos, **Petite contribution à l'histoire de la radio**, L'Harmattan, 2012.

J. Tournet-Lammer (sous la dir.), **Cahiers d'histoire de la radiodiffusion**, n° 114, 2012.

J.-C. B. Montagné, **Transmissions**, 2008.

Ph. Monod-Broca, **Branly. Au temps de ondes et des limailles**, Belin, 1990.

H. G. J. Aitken, **The Continuous Wave. Technology and American Radio, 1900-1932**, Princeton University Press, 1985.

E. Barnouw, **A History of Broadcasting in the United States** (3 vol.), Oxford University Press, 1966-1970.

S. L. Archer, **History of radio to 1926**, *The American Historical Society*, 1938.

La radio, une boîte à musique pour tous

J'ai en tête un projet qui pourrait faire de la radio un objet utilitaire domestique comme le piano ou le phonographe. Il s'agit d'apporter par les ondes la musique à domicile… On peut imaginer les postes comme de simples « boîtes à musique radio » composées d'un amplificateur à lampes et d'un haut-parleur logés dans une boîte installée dans le salon, sur lesquels on pourrait changer de longueur d'onde en appuyant sur un bouton.

Lettre de David Sarnoff, futur président de la *Radio Corporation of America* (RCA) à Edward Nally, vice-président de la *Marconi Wireless Telegraph Company of America*, 30 septembre 1915.

La sélection de livres

POUR LA

SCIENCE

Pour vos congés, à la plage, à la campagne ou chez vous, *Pour la Science* vous propose sa sélection “La science ludique”.
Qu’il s’agisse d’enquêtes médicales, de récréations mathématiques ou physiques, de cuisine ou d’expériences faciles, vous ne verrez pas le temps passer !

Les sens trompés

Des anomalies du cerveau aux comportements étranges

Patrick Verstiche

Cet ouvrage est un recueil des articles que le neurologue Patrick Verstichel a publiés dans le magazine *Cerveau & Psycho*. L’auteur, médecin clinicien, nous propose des « enquêtes médicales » sur des cas cliniques parfois difficiles à élucider !

Éditions Belin/Pour la Science 201
60 pages – 25 euros – ISBN 978-2-84245-111-0

Nouveauté

Réf. 075111

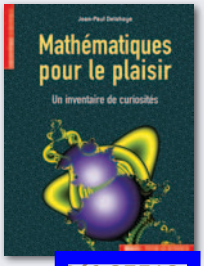
Mathématiques pour le plaisir

Un inventaire de curiosités

Jean-Paul Delahaye

Arts et mathématiques, géométries amusantes, jeux, nombres, casse-tête et énigmes… Les mathématiques sont une source de joie et d’épanouissement pour celui qui sait y consacrer un peu d’attention et d’esprit ludique !

Éditions Belin / Pour la Science 2010
208 pages – 25,40 euros – ISBN 978-2-8424-5104-2



Réf. 075104

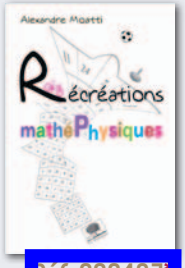
Récréations mathéphysiques

De l’Antiquité au XXIe siècle

Alexandre Moatti

À quoi sert la clé du numéro de sécurité sociale ? Qu’y a-t-il au centre d’un carré magique ? Platon et Euler, inventeurs du ballon de football ? Comment marche l’algorithme d’ordre des résultats dans un moteur de recherche ? Matéphysiques, parce que les maths et la physique, cela marche ensemble, et que ces Récréations peuvent vous faire réfléchir… comme la métaphysique !

Éditions le Pommier 201
60 pages – 15 euros – ISBN 978-2-7465-0482-5



Réf. 090487

La science en cuisine !

De la science aux fourneaux

Réf. 075087

Hervé This

Cuisinons en connaissance de cause, tel est l’adage d’Hervé This. Il tente de comprendre les processus moléculaires qui sous-tendent l’élaboration de mets : la cuisson, les émulsions, les gelées, les tanins, les associations salé-sucré ou doux-amer. Il élucide les tours de main d’hier et propose les recettes de demain !

Éditions Belin / Pour la Science 2007
368 pages – 26,40 euros – ISBN 978-2-8424-5082-8

La cuisine note à note

Hervé This

Qu’est-ce que la “cuisine note à note” ? La réalisation de mets à partir de composés purs, mélangés habilement. À côté des épices traditionnelles, ces composés enrichissent les étagères de la cuisine ! À la clé, des goûts nouveaux et une infinité de possibles pour des cuisiniers créatifs. Nos fruits, légumes, viandes et poissons céderont-ils la place à des composés purs ?

Éditions Belin 2012
208 pages – 19,90 euros – ISBN 978-2-7011-6419-9

Réf. 0064

En partenariat avec les éditeurs

Belin : ÉDITEUR INDÉPENDANT DEPUIS 1777

Le Pommier

Tous ces livres sont également disponibles en librairie.

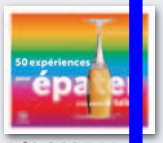
LA SÉLECTION POUR LA SCIENCE C'EST AUSSI...

a science entre amis !

50 expériences pour épater vos amis à table

Jack Guichard et Guy Simonin, Photos de Josselin Guichard avec la collaboration de Kamil Fadel

Vous allez surprendre vos amis avec ces expériences étonnantes : retournez votre verre de vin sans en perdre une goutte, transformez l'eau en vin, créez un nuage dans une bouteille, mettez une olive en lévitation ! Des expériences très faciles à réaliser et enrichies d'une explication simple et compréhensible des phénomènes scientifiques en jeu.



Éditions Le Pommier 2011
168 pages – 18,90 euros – ISBN 978-2-7465-0544-5

Réf. 090544*

50 expériences pour épater vos amis au jardin

Nouveau

Jack Guichard, Kamil Fadel et Guy Simonin, Photos de Josselin Guichard

Voici 50 nouvelles expériences pour surprendre vos amis lors d'une journée au jardin, à la campagne ou simplement sur votre terrasse : marcher sur l'eau, tirer la nappe sans faire tomber ce qui est sur la table, créer un double arc-en-ciel, transpercer un ballon sans qu'il explose !

Réf. 090618*

Éditions Le Pommier 2013
168 pages – 18,90 euros – ISBN 978-2-7465-0618-3

a science des fous de nature !

La Terre

André Prost

Comment naissent les dunes ? Comment une rivière creuse-t-elle une vallée ? Comment se forment les grottes ? Qu'est-ce qu'un glissement de terrain ? Pourquoi les pierres éclatent-elles sous l'action du froid ? Comment apparaît une source ? Dans ce livre, l'auteur propose une cinquantaine d'expériences faciles et amusantes pour comprendre comment le vent, la pluie, la glace, les cours d'eau... modèlent le visage de la Terre.

Réf. 0024011

Éditions Belin 1999
128 pages – 12,25 euros – ISBN 978-2-7011-2401-8

Les saisons

Pierre Causeret, Liliane Sarrazin

Notre vie est rythmée par la succession des jours et des nuits et par celle des saisons. Si ces alternances nous sont familières, leurs causes ne sont pas toujours bien comprises. Pourquoi fait-il plus chaud en été ? Pourquoi les nuits d'hiver sont-elles si longues ? Pourquoi les quatre saisons n'ont-elles pas toutes la même durée ?... À partir de l'observation des astres et en s'appuyant sur de nombreuses expériences amusantes, cet ouvrage fournit une description complète et détaillée des mouvements de la Terre et des saisons.

Réf. 00227

Éditions Belin / Pour la Science 2001
128 pages – 18,25 euros – ISBN 978-2-7011-2705-7

Petit précis de physique à déguster

Isaac Mc Phee

Éditions Belin 2011
176 pages – 16,30 euros
ISBN 978-2-7011-5958-4

Réf. 005951

Petit précis de chimie à déguster

Joel Levy

Éditions Belin 2011
176 pages – 16,30 euros
ISBN 978-2-7011-5959-1

Réf. 005951

Les illusions

L'Essentiel Cerveau & Psycho n°12
nov. 2012-janv. 2013
Éditions Pour la Science
96 pages – 6,95 euros

Réf. 026911

Pour commander ces ouvrages renvoyez le bon de commande ci-dessous ou connectez-vous sur www.pourlascience.fr/librairie (sauf références signalées par un * sur www.editions-belin.fr)

BON DE COMMANDE

POUR LA SCIENCE

...0 Vineuil • Tél. : 0 805 655 255 • e-mail : pourlasciencevpc@daudin.f

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

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

J'indique mes coordonnées

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

Je choisis mon mode de règlement

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

Signature obligatoire

DPL429 offre 1

Belin ÉDITEUR INDÉPENDANT DEPUIS 1777 — Le Pommier

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

LOGIQUE & CALCUL

L'embarrassant paradoxe de Simpson

Les statistiques conduisent à des décisions fondées et rationnelles… à moins qu'un paradoxe ne s'en mêle, comme cela arrive avec certains jeux de données.

Jean-Paul DELAHAYE

Un bon paradoxe est un paradoxe dont on ne réussit jamais à se débarrasser. Quand vous croyez en avoir trouvé la clef, une remarque vous fait découvrir que rien n'est résolu. Les paradoxes de Zénon à propos de l'impossibilité du mouvement sont de tels paradoxes. Mais le plus élémentaire de tous est le paradoxe de Simpson dont on imagine des solutions… qui conduisent à d'autres paradoxes !

Sans cesse, des scientifiques et des utilisateurs de statistiques tombent dans les pièges qu'il tend. Chaque année, paraissent des articles qui tentent de déterminer son sens profond et la façon dont on doit le traiter. Malgré cette littérature abondante, il n'est pas certain que l'on détienne une solution entièrement satisfaisante pour se libérer de cette récalcitrante absurdité.

Imaginons la situation suivante. On mène des tests en double aveugle sur un nouveau médicament traitant la maladie grave MG. On a traité 160 patients, dont 80 ont reçu le médicament, et les 80 autres un placebo.

Le taux de guérison varie selon que l'on considère les malades ayant pris le médicament ou ceux ayant pris le placebo *(voir le tableau 1 ci-contre)*. Parmi les 80 patients ayant pris le médicament, 40 ont été guéris (50 %). Parmi les 80 patients ayant reçu le placebo, seuls 32 ont été guéris (40 %). Ces résultats suggèrent que le médicament est efficace. Il faut donc le prescrire pour soigner les patients atteints de la maladie MG.

Mais en analysant plus en détail les données et en considérant le sexe des personnes ayant participé aux tests, on a une surprise : parmi les hommes, le placebo réussit mieux que le médicament, et il en va de même parmi les femmes. La somme des deux tableaux 2 et 3 redonne bien le tableau 1.

Total	Guéri	Non gué	Taux de guérison
Médicament	40	40	50 %
Placebo	32	48	40 %

Hommes	Guéri	Non gué	Taux de guérison
Médicament	36	24	60 %
Placebo	14	6	70 %

Femmes	Guéri	Non gué	Taux de guérison
Médicament	4	16	20 %
Placebo	18	42	30 %

Les trois tableaux sont compatibles, aucune erreur ne s'est produite. Les résultats sont sans appel : chez les hommes, le placebo est meilleur que le médicament ; chez les femmes, le placebo est meilleur que le médicament. Pourtant, en regroupant hommes et femmes, le médicament produit de meilleurs résultats que le placebo. On se trouve dans un cas du paradoxe de Simpson : la fusion de données concluant individuellement dans un sens – l'inutilité du médicament testé – donne des résultats concluant dans le sens inverse, l'utilité du médicament.

La plus lointaine mention d'un cas analogue remonte à 1899, où le mathématicien anglais Karl Pearson décrivit des données équivalentes. Plus tard, en 1903, Undy Yule redécouvrit le phénomène, et le Britannique Edward Simpson (né en 1922) écrivit en 1951 un article où cette singularité statistique était soigneusement étudiée et discutée. Assez injustement aujourd'hui, ce type de données paradoxales porte son nom.

De nombreux cas réels présentent cette inversion de résultat lorsqu'on regroupe plusieurs catégories complémentaires en une seule. Chaque année, on découvre de nouveaux exemples produisant étonnement et incrédulité. On a rencontré le paradoxe à propos des taux d'admission des filles dans divers départements de l'Université de Berkeley en 1973 : elles étaient meilleures que les garçons dans la plupart des départements de l'université, mais quand on fusionnait les résultats, leur taux général d'admission à l'université était inférieur à celui des garçons. De nombreux cas en médecine ont été rapportés. Le paradoxe a aussi été rencontré à propos de l'analyse des matchs de basket-ball, en démographie, dans l'étude des risques d'accidents, etc. *(voir l'encadré 1)*.

Explication arithmétique

Avant de tenter de savoir s'il faut oui ou non prescrire le médicament testé dans le cas des tableaux 1-3, étudions l'arithmétique du paradoxe. Si l'on note A, B, C et D les quatre nombres du premier tableau, a, b, c et d les quatre nombres du second tableau, a', b', c' et d' les quatre nombres du troisième tableau, on a les relations suivantes :

$A = a + a' ; B = b + b' ; C = c + c' ; D = d + d' ;$

$A/B > C/D ; a/b < c/d ; a'/b' < c'/d'$

L'étonnement vient de ce que l'on croit que [$a/b < c/d$ et $a'/b' < c'/d'$] entraîne $A/B < C/D$, ou encore avec seulement les petites lettres : [$a/b < c/d$ et $a'/b' < c'/d'$] entraîne $(a + a')/(b + b') < (c + c')/(d + d')$.

Or aucune démonstration n'établira cette implication entre inégalités arithmétiques, puisque justement les nombres des tableaux 1-3 vérifient les deux premières inégalités et pas la troisième : $36/24 < 14/6$ et $4/16 < 18/42$, mais $40/40 > 32/48$ (soit $1,5 < 2,33$ et $0,25 < 0,42$, mais $1 > 0,66$).

Sur le plan arithmétique, il n'y a pas le moindre paradoxe – seulement une légère surprise dont on se libère en analysant l'exemple qui nous montre que même si $a/b < c/d$ et $a'/b' < c'/d'$, il ne faut pas en conclure que $(a+a')/(b+b') < (c+c')/(d+d')$.

Une représentation graphique des données *(voir l'encadré 2)* illustre pourquoi il ne faut pas s'étonner de rencontrer des jeux de huit paramètres produisant le « paradoxe ». Cette représentation conduit d'ailleurs à découvrir des cas encore plus simples de jeux de données présentant la prétendue anomalie. En imposant aux variables d'être des entiers entre 1 et 4, on trouve pour les huit paramètres quatre solutions qui sont :

(1, 2, 3, 4, 4, 2, 3, 1) (1, 3, 2, 4, 4, 3, 2, 1)
(4, 2, 3, 1, 1, 2, 3, 4) (4, 3, 2, 1, 1, 3, 2, 4).

Lorsqu'on impose aux variables d'être des entiers entre 1 et 5, le nombre de solutions explose : il y en a 232. Pour l'intervalle de 1 à 6, il y en a 1 370. Pour les intervalles suivants, le nombre de solutions est 8 126, puis 28 252, puis 86 140, etc. La proportion de jeux de huit entiers pris entre 1 et n vérifiant les inégalités du paradoxe ou les inégalités inverses qui sont aussi paradoxales) tend vers 0,9606 % quand n tend vers l'infini.

Comment raisonner ?

Tout n'est cependant pas réglé pour autant et, dans la réalité, un médecin face aux données des trois tableaux indiqués doit prendre une décision : oui ou non, faut-il prescrire le médicament qui semble efficace (d'après le tableau 1) et qui semble moins bon que le placebo (d'après les tableaux 2 et 3) ?

Imaginez-vous à la place du médecin. Comment allez-vous raisonner ? Plusieurs attitudes sont possibles.

1. Trois exemples réels

Parmi des dizaines d'autres, voici trois cas réels où le paradoxe de Simpson a produit des surprises et a contraint à analyser plus finement ce que des manipulations statistiques imprudentes faisaient apparaître.

Aptitudes en progrès pour tous, mais dont la moyenne est stable.

Aux États-Unis, au cours des années 1981-2002, la moyenne des notes obtenues par les élèves soumis au test linguistique SAT *(Scholastic Aptitude Test)* a été stable, avec un résultat toujours proche de 504 points. Pourtant, durant cette période, la moyenne pour le test mesuré séparément par groupe ethnique s'est accrue dans chaque groupe d'au moins huit points.

Gerald Bracey, de l'Université George Mason, a étudié cet étrange phénomène et a conclu qu'on était à en présence d'un cas du paradoxe de Simpson.

La clef de l'explication se trouve dans le fait que pendant la période considérée, le nombre d'élèves blancs soumis au test a proportionnellement décru, et que la proportion d'élèves appartenant à des minorités (réussissant en général moins bien le test linguistique) a augmenté, conduisant au total à une stagnation des résultats globaux qui, pourtant, progressaient dans chaque catégorie.

Mauvais taux de mortalité dans chaque tranche d'âge, mais globalement bons.

En 1986, Joel Cohen, de l'Université Rockefeller à New York, a identifié un cas réel de paradoxe de Simpson dans le domaine de la démographie. Il s'est intéressé à la mortalité au Costa Rica et en Suède (connue pour son excellente espérance de vie). Sans surprise, il a trouvé qu'en 1960, le taux de mortalité des femmes dans toute tranche d'âge fixée était supérieur au Costa Rica, comparé au taux équivalent en Suède. Pourtant, le taux de mortalité général des femmes au Costa Rica était inférieur à celui de la Suède.

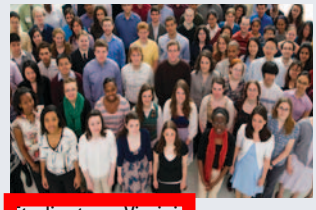
L'explication est encore liée au paradoxe de Simpson, et elle provient de la structure différente des populations. La population du Costa Rica est beaucoup plus jeune en moyenne que celle de la Suède, et donc les jeunes classes d'âge (qui ont un faible taux de mortalité) pèsent plus dans la moyenne pour le Costa Rica que pour la Suède, conduisant à un taux de mortalité global assez faible au Costa Rica, malgré un taux assez mauvais dans chaque tranche d'âge.

En roulant plus vite, vous aurez moins d'accidents.

Gary Davis, de l'Université du Minnesota, étudiait en 2004 la relation entre le nombre d'accidents piéton-véhicule et la vitesse moyenne des véhicules en divers endroits d'une ville.

Il proposa une modélisation de cette relation qu'il voulait utiliser pour évaluer l'intérêt de limiter plus sévèrement la vitesse autorisée des véhicules. De façon inattendue, le modèle montrait qu'en faisant passer la limite de 30 miles par heure à 25, le nombre d'accidents augmenterait.

Là encore, bien que pour chaque type de sites, le nombre d'accidents diminuait quand la vitesse limite était réduite, une agrégation malheureuse des données (qui ne prenait pas en compte que le nombre d'accidents était bien plus rare dans les zones résidentielles) entraînait une conclusion absurde.

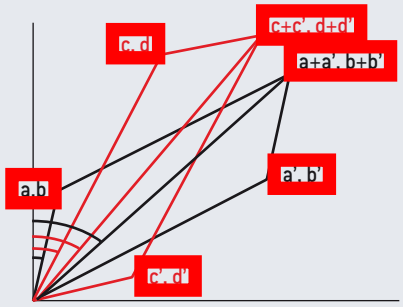

Étudiants en Virginie

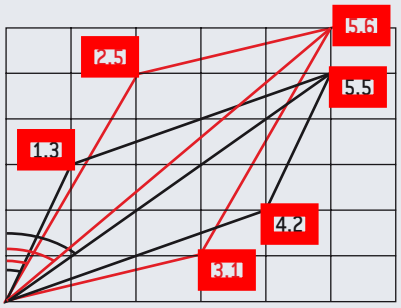
Rue au Costa Rica

Rue en Suède

Limitation de vitesse

2. Interprétation graphique





Le paradoxe de Simpson apparaît lorsque $a/b < c/d$, $a'/b' < c'/d'$ et que néanmoins $(a + a')/(b + b') > (c + c')/(d + d')$. Les graphiques où les rapports a/b sont une fonction monotone des angles indiqués en fournissent la preuve graphique. Grâce à cette représentation, on trouve un exemple qui prouve que les trois inégalités, même dans des cas simples impliquant de petits nombres, peuvent être vraies simultanément.

Point de vue 1. Quand j'ignore si c'est un homme ou une femme (car par exemple je suis en train de traiter le cas d'un malade anonyme), je ne tiens compte que de la statistique générale qui est celle qui s'applique dans ce cas. Je donne donc le médicament, car je sais qu'il conduit à la guérison dans 50 % des cas d'après le tableau 1, alors que le placebo ne conduit à la guérison que dans 40 % des cas. En revanche, lorsque j'ai plus de précisions sur la personne à traiter et que je sais s'il s'agit d'un homme ou d'une femme, je regarde la statistique correspondante (donc le tableau 2 ou le tableau 3). Pour un homme, je donne le placebo, car la statistique du tableau 2 pour les hommes me conseille de donner le placebo. Pour une femme, je donne aussi le placebo, car la statistique du tableau 3 pour les femmes me dit que c'est préférable. L'information sur le sexe du patient me conduit à changer de prescription. Ce n'est pas absurde : l'apport de nouvelles informations justifie souvent de changer ses choix.

Mais à y regarder de près, ce point de vue met mal à l'aise et ne semble pas rationnel. C'est ce qu'exprime le second point de vue.

Point de vue 2. La conclusion du point de vue 1 est absurde. Un patient est soit un homme, soit une femme, et que ce soit l'un ou l'autre quand je connais le sexe du patient la consigne déduite est la même : donner le placebo. Ma décision ne dépend pas du résultat de la question : « S'agit-il d'un homme ou d'une femme ? » Il en résulte donc, de toute évidence, que même quand j'ignore le sexe du patient, je dois donner le placebo et ne pas tenir compte de la statistique générale qui ne sert plus à rien dès l'instant où je dispose des deux statistiques particulières. On se trouve dans un cas assez usuel : la connaissance de nouvelles données (ici les statistiques particulières concernant séparément les hommes et les femmes) change la conclusion que je faisais avant d'en disposer. Ce changement est général et n'est pas dû à ma connaissance du sexe du patient, mais à ma connaissance des tableaux 2 et 3. Il n'y a rien d'irrationnel à changer d'avis quand on est mieux informé, certes, mais ici le changement doit conduire à oublier le tableau 1 qui ne sert plus à rien quand on a les deux autres.

Notons que, pour tirer une règle de données statistiques, on exige en général d'avoir des effectifs totaux plus élevés que ceux qui apparaissent dans nos tableaux. Mais cela est sans importance pour tout ce que nous venons de dire et pour tout ce que nous dirons plus loin, car on peut très bien imaginer que tous les nombres de nos tableaux sont multipliés par 100 ou même 10 000 et que les déductions que nous faisons des statistiques des tableaux sont de ce fait parfaitement sûres.

Le point de vue 2 est confirmé par un argument formel : de (A ⇒ B) et (non-A ⇒ B), on déduit B. C'est ce qu'on nomme parfois le « principe de la chose sûre » : si, lorsque A est vrai, j'en déduis B, et que, lorsque A est faux, j'en déduis aussi B, alors c'est que B est toujours vrai.

Le point de vue 2 correspond à l'analyse classique du paradoxe et semble nous en libérer. On l'exprime parfois en disant qu'il

Yeux clairs	Guéri	Non gué	Taux de guérison
Médicament	20	20	50 %
Placebo	16	24	40 %

Yeux foncés	Guéri	Non gué	Taux de guérison
Médicament	20	20	50 %
Placebo	16	24	40 %

H.yeux clairs	Guéri	Non gué	Taux de guérison
Médicament	19	13	59.375 %
Placebo	6	2	75 %

H.yeux foncés	Guéri	Non gué	Taux de guérison
Médicament	17	7	60,71 %
Placebo	8	4	66.66 %

F.yeux clairs	Guéri	Non gué	Taux de guérison
Médicament	1	7	12,5 %
Placebo	10	22	31.25 %

F.yeux foncés	Guéri	Non gué	Taux de guérison
Médicament	3	9	25 %
Placebo	8	20	28.57 %

© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013

aut prendre des précautions pour agréger des données. Je croyais satisfaisant ce point de vue, quand j'ai pris conscience d'une critique qui en montre l'absurdité.

Plus rien ne va !

Critique du point de vue 2. Imaginons que je dispose aussi d'une statistique sur les patients aux yeux clairs et d'une statistique sur les patients aux yeux foncés, et qu'elles mènent chacune à la conclusion que le médicament est plus efficace que le placebo.

Une telle situation est tout à fait possible et les données que nous proposons pour les tableaux 4 et 5 sont compatibles avec les trois premiers tableaux. C'est ce que démontrent les tableaux suivants 6, 7, 8 et 9 ; pour chacune des quatre catégories « Hommes aux yeux clairs », « Hommes aux yeux foncés », « Femmes aux yeux clairs », « Femmes aux yeux foncés », ils indiquent les taux de réussite respectifs du médicament et du placebo.

On vérifiera sans peine que les tableaux 6 et 7 redonnent 2, que 8 et 9 redonnent 3, que 6 et 8 redonnent 4, et enfin que 7 et 9 redonnent 5. Une situation comme celle envisagée ici est parfaitement possible.

Avec ces tableaux, le point de vue 2 est insoutenable. En effet, si j'adopte ce point de vue et que je l'applique non pas à la distinction homme-femme, mais à la distinction yeux clairs-yeux foncés, je dois conclure qu'il faut prescrire le médicament. Le point de vue 2 conduit donc, selon qu'on s'attache au sexe des patients ou à la couleur de leurs yeux, à des prescriptions contradictoires. Dans le cas décrit par l'ensemble des tableaux présentés, tous parfaitement compatibles, le point de vue 2 conduit à deux conclusions opposées ; il serait irrationnel de le défendre. En résumé, le point de vue 1 est clairement absurde, et le point de vue 2 aussi car il conduit à des prescriptions contradictoires. Comment sortir du paradoxe ?

Il semble inévitable d'opter pour un point de vue prudent et d'admettre que sans données plus précises, aucune prescription ne sera sûre. Ce point de vue 3, expliqué ci-dessous, ne satisfera pas le médecin qui n'a pas la possibilité de différen

3. Le «Double-Simpson»

Ce jeu de données, que nous nommons le « Double-Simpson », a été découvert par Jean-François Colonna le 26 mars 2013 en menant des calculs intensifs. Il a les propriétés paradoxales suivantes.

- Dans le tableau 1, on considère une population de 183 personnes séparées en deux groupes complémentaires dont l'un prend le médicament et l'autre un placebo. Le taux de guérison est meilleur pour le groupe prenant le médicament qui semble donc devoir être prescrit aux malades.
- Quand on sépare les hommes et les femmes (tableaux 2 et 3), pour chaque catégorie le placebo est meilleur que le médicament. C'est le paradoxe de Simpson simple.
- Quand on considère séparément les personnes aux yeux clairs et les personnes aux yeux foncés (tableaux 4 et 5), le médicament est à nouveau meilleur.
- De plus, et ce fut le point le plus délicat à satisfaire, les données des tableaux 1-5 résultent de deux séries de tableaux, soit A6-A7-A8-A9, soit B6-B7-B8-B9, aux propriétés opposées. Pour chacune des quatre catégories (« Hommes aux yeux clairs », « Hommes aux yeux foncés », « Femmes aux yeux clairs », « Femmes aux yeux foncés »), selon qu'on lit les tableaux A ou B dans la même catégorie, on trouve que le médicament surpasse le placebo ou l'inverse, mais on n'a jamais le même résultat pour A et B.

Cette divergence systématique entre les données A et B montre que quelqu'un disposant des tableaux 1-5 ne peut rien conclure pour aucune personne quelle que soit sa catégorie (Homme, Femme, Yeux clairs, Yeux foncés).

Général	Guéri	Non gué	Taux de guérison
Médicament	47	42	52,80 %
Placebo	38	56	40,42 %

Hommes	Guéri	Non gué	Taux de guérison
Médicament	40	26	60,60 %
Placebo	16	9	64 %

Femmes	Guéri	Non gué	Taux de guérison
Médicament	7	16	30,43 %
Placebo	22	47	31,88 %

Yeux clairs	Guéri	Non gué	Taux de guérison
Médicament	4	19	55,81 %
Placebo	1	26	42,85 %

Yeux foncés	Guéri	Non gué	Taux de guérison
Médicament	23	23	50 %
Placebo	17	28	37,77 %

A6	Guéri	Non gué	Taux de guérison
H. yeux clairs			
Médicament	21	13	61,76 %
Placebo	8	5	61,53 %

A7	Guéri	Non gué	Taux de guérison
H. yeux foncés			
Médicament	19	13	59,37 %
Placebo	8	4	66,66 %

A8	Guéri	Non gué	Taux de guérison
F. yeux clairs			
Médicament	3	6	33,33 %
Placebo	13	23	36,11 %

A9	Guéri	Non gué	Taux de guérison
F. yeux foncés			
Médicament	4	10	28,57 %
Placebo	9	24	27,27 %

B6	Guéri	Non gué	Taux de guérison
H. yeux clairs			
Médicament	1	14	6,6 %
Placebo	3	4	69,23 %

B7	Guéri	Non gué	Taux de guérison
H. yeux foncés			
Médicament	19	12	61,29 %
Placebo	7	5	58,33 %

B8	Guéri	Non gué	Taux de guérison
F. yeux clairs			
Médicament	3	5	37,50 %
Placebo	2	24	33,33 %

B9	Guéri	Non gué	Taux de guérison
F. yeux foncés			
Médicament	4	11	26,66 %
Placebo	10	23	30,30 %

© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013

son choix, mais l'éventualité de cas tels que ceux décrits ci-dessus, et encore plus tels que celui décrit à la figure 4, force cette conclusion attentiste.

Une attitude prudente

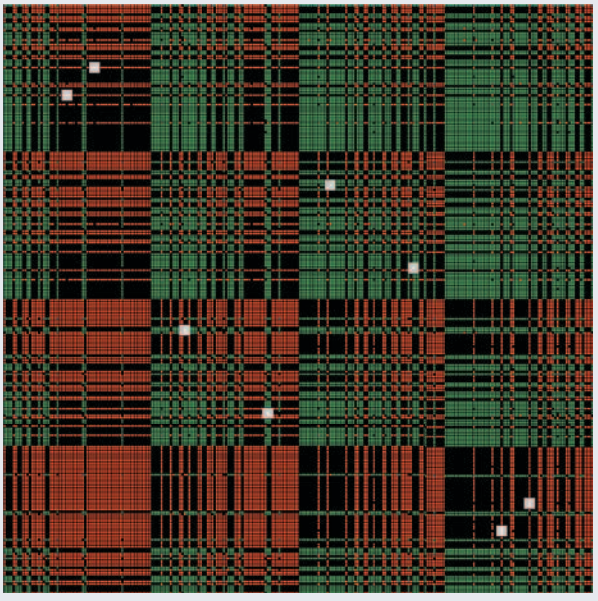
Point de vue 3. Dans une situation où seules les données des tableaux 1, 2 et 3 sont disponibles, aucune prescription ne s'impose absolument, du fait de l'existence possible d'une partition contradictoire comme celle donnée par les tableaux 4 et 5. Celui qui dispose des données des tableaux 6, 7, 8 et 9, qui indiquent pour chaque catégorie précise (sexe connu et couleur des yeux connue) si le médicament est meilleur que le placebo pourra en revanche prescrire un traitement à un patient dont on connaît le sexe et la couleur des yeux : il se référera au tableau le concernant. Ce jugement prudent est confirmé par deux arguments.

Argument 1. Quand on dispose de données analogues à celles du tableau 1 indiquant que « le taux de guérison est meilleur avec le médicament qu'avec le placebo ») et que les effectifs ne sont pas trop petits (supérieurs à 3), il est toujours possible de faire une partition des patients en deux catégories complémentaires de façon à avoir des tableaux 2 et 3 produisant des conclusions opposées à celle du tableau 1 (« le placebo est meilleur »).

En effet, composons la catégorie 1 de patients guéris par le placebo (on en garde au moins un pour la catégorie 2) et aucun de la catégorie que le placebo ne guérit pas, auxquels on ajoute tous les patients que le médicament guérit et quelques patients que le médicament ne guérit pas. Ce choix assure que dans la catégorie 1, le taux de réussite du placebo est 100 %, et qu'il ne l'est pas pour le médicament. Dans la catégorie 2, il n'y a aucun patient que le médicament guérit (ils ont tous été mis dans la catégorie 1) et donc le taux de guérison avec le médicament est nul, ce qu'il n'est pas pour le placebo puisqu'on a réservé au moins un patient guéri par le placebo pour la catégorie 2. Aussi bien dans la catégorie 1 que 2, le placebo sera donc strictement meilleur que le médicament. Si les coefficients du tableau 1 sont (2, 2, 2, 3), la méthode décrite donne (2, 1, 1, 0) pour le tableau 1 et (0, 1, 1, 3) pour le tableau 2.

Ce type de partages est certes artificiel, mais il montre que le risque de paradoxe de

4. Visualisation de la fréquence du paradoxe



7 = 0×64 + 1×16 + 2×4 + 3×1 = 0123 en base 4

27	Guéri	Non guéri	Taux de guérison
Médicament	1	3	25 %
Placebo	2	4	33 %

le placebo est meilleur

16 = 3×64 + 1×16 + 2×4 + 0×1 = 3120 en base 4

216	Guéri	Non guéri	Taux de guérison
Médicament	4	3	57 %
Placebo	2	1	66 %

le placebo est meilleur

ATRICE SOMM

243	Guéri	Non guéri	Taux de guérison
Médicament	5	6	45,45 %
Placebo	4	5	44,44 %

le médicament est meilleur

Cette figure représente l'ensemble des cas possibles lorsqu'on considère le nombre de guérisons pour des patients hommes prenant le médicament ou le placebo et pour des patientes femmes prenant le médicament ou le placebo (cela correspond aux tableaux 2 et 3 du texte). On a envisagé tous les cas lorsque les huit éléments des deux tableaux parcourent toutes les valeurs entières entre 1 et 4. Cela fait $4^8 = 65\,536$ cas différents.

En regroupant les tableaux hommes et femmes d'un cas, on obtient un tableau de synthèse (hommes et femmes réunis) qui donne parfois une situation de type « paradoxe de Simpson » : les tableaux hommes et femmes vont dans le même sens (le médicament est meilleur, ou le placebo est meilleur), mais le tableau synthétique donne une conclusion opposée.

Chacun des 65 536 cas est représenté par un pixel. Les quatre coefficients du tableau pour les hommes (première colonne : a, b ; deuxième colonne : c, d) fournissent l'abscisse du pixel en considérant le nombre entier dont l'écriture en base 4 a pour chiffres $(a-1), (b-1), (c-1), (d-1)$. Les quatre coefficients du tableau pour les femmes donnent, selon le même codage, l'ordonnée du pixel. La couleur du pixel est choisie selon les règles suivantes.

– Si on a un cas « normal » (les tableaux hommes et femmes donnent une même conclusion, qui est aussi celle du tableau de synthèse), le pixel est vert ou marron selon que le placebo l'emporte dans le cas général ou non.

– Si on a un cas sans grand intérêt (les tableaux hommes et femmes se contredisent, ou il y a égalité entre les succès du médicament et du placebo), le pixel est noir.

– Si on a un cas de paradoxe de Simpson (le tableau de synthèse s'oppose aux deux tableaux hommes et femmes qui vont dans le même sens), le pixel est clair, entouré d'un halo pour aider à le repérer. Il n'y a que huit cas, correspondant aux huit pixels (27, 216), (39,228), (78,114), (114,78), (141,177), (177, 141), (216, 27) et (228, 39), le premier étant détaillé ci-contre.

Cette représentation, imaginée et réalisée par Jean-François Colonna, montre qu'heureusement le paradoxe de Simpson se produit assez rarement.

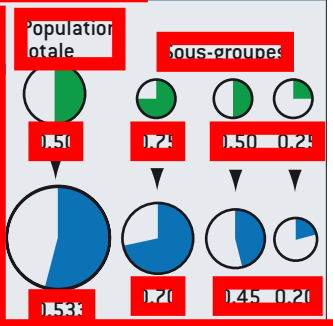
© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013

5. Le paradoxe de Simpson et l'émergence de la coopération

Dans la compétition entre organismes biologiques, le maintien des « biens communs » est une question importante. Lorsqu'il y a un producteur de ce bien commun et un consommateur (un organisme qui en bénéficie sans le produire), les consommateurs ont tendance à proliférer aux dépens des producteurs. L'oxygène de l'air est un exemple de bien commun produit seulement par certains organismes et consommé par d'autres qui ne le produisent pas. En 2009, des chercheurs de l'Université Rockefeller à New York (John Chuang, Olivier Rivoire, Stanislas Leibler) ont créé et étudié une telle situation avec deux souches de la bactérie *Escherichia coli*. L'une des souches produisait un antibiotique utile aux deux souches et l'autre en profitait sans le produire. Les chercheurs ont composé plusieurs groupes de bactéries, chaque groupe comportant les deux types de bactéries. Une situation apparemment paradoxale est apparue : les non-producteurs croissaient plus vite dans chaque groupe (ce qui n'est pas une surprise) bien qu'au total, les non-producteurs voyaient leur effectif global décroître en proportion. Il s'agissait d'un phénomène de type paradoxe de Simpson.

Pour un biologiste, ce système est un exemple frappant de conflit entre niveaux de sélection. Les bactéries productrices du bien commun sont les bénéficiaires de l'ensemble du système quand on les considère comme un tout, alors qu'à un niveau individuel (celui auquel opère la sélection), elles sont désavantagées puisque dans chaque groupe leur proportion diminue.

Grâce aux effets du paradoxe de Simpson, un trait qui bénéficie à la population considérée comme un tout peut ainsi se trouver sélectionné, bien qu'à un niveau individuel le trait soit désavantageux. La chose est étonnante : ce qui est mauvais au niveau individuel se trouve au total favorisé par l'effet mécanique d'un paradoxe de Simpson. La réalisation concrète de l'expérience par les chercheurs démontre que cet effet sélectif paradoxal n'est pas seulement théorique, mais doit être pris en compte par les spécialistes de l'évolution. Cette dynamique doit être envisagée comme un mécanisme de sélection de traits individuels favorables à la coopération et à l'altruisme. Utiliser le paradoxe de Simpson est l'une des ruses que la sélection naturelle mettrait en œuvre pour favoriser les traits coopératifs et faire ainsi émerger et prospérer des entités collectives d'individus coopérateurs et solidaires.



En vert, la proportion initiale de bactéries de type 1. En bleu, la proportion finale de bactéries de type 1.

Simpson est toujours présent : tout tableau composé de données pas trop petites est susceptible d'être séparé en deux tableaux créant un paradoxe de Simpson.

Argument 2. Il existe des situations que l'on nommera « Double-Simpson », dont la première a été découverte par Jean-François Colonna, du Centre de mathématiques appliquées de l'École polytechnique, où :

– Le tableau 1 suggère que le médicament est meilleur que le placebo.

– Les tableaux 2 et 3 suggèrent que le placebo est meilleur que le médicament.

– Les tableaux 4 et 5 suggèrent que le médicament est meilleur que le placebo.

– Il existe deux jeux de données (tableaux 6A-9A et tableaux 6B-9B) compatibles avec les tableaux 1-5 et tels que pour chaque catégorie précise (il y en a quatre), ce que laissent supposer les données A est l'inverse de ce que suggèrent les données B *(voir l'encadré 3)*.

Cette possibilité de jeux A et B conduisant à des prescriptions opposées pour chacune des quatre catégories n'était pas connue avant les expériences numériques de J.-F. Colonna. Elle établit définitivement que dans certaines situations, celui qui veut des certitudes absolues ne peut agir à cause du paradoxe de Simpson.

Heureusement, dans les cas que nous avons envisagés, celui qui est prêt à prendre le risque de se tromper (en médecine le prescripteur est souvent dans une telle situation) réussira à prendre des décisions à peu près sûres. On montre en effet que celui qui connaît un tableau comme notre tableau 1 et le sépare en deux catégories complémentaires ne tombera sur des résultats opposés (tels les tableaux 2 et 3) qu'avec une probabilité de 1,92 %. De même, en fusionnant deux tableaux donnant des indications dans le même sens, la probabilité que le tableau résultant contredise les deux premiers est faible. De même encore, la probabilité que trois tableaux, dont l'un est la somme des deux autres, présentent un paradoxe de Simpson est faible.

La conclusion est que même si les cas où le paradoxe de Simpson se produit sont vraiment gênants (c'est ce qu'établit le « Double-Simpson »), ils sont heureusement assez rares. On peut donc prendre le risque... de ne pas y penser ! ■

L'AUTEUR

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

BIBLIOGRAPHIE

J. Pearl, **Simpson's paradox : An anatomy**, 2011 : http://escholarship.org/uc/item/3s62r0d6

H. Goltz et M. Smith, **Yule-Simpson paradox in research**, *Practical Assessment, Research & Evaluation*, vol. 15, 2010 : http://pareonline.net/pdf/v15n15.pdf

J. Chuang *et al.*, **Simpson's paradox in a synthetic microbial system**, *Science*, vol. 323, pp. 272-275, 2009.

M. Pavlides et M. Perlmen, **How likely is Simpson's paradox ?** *The American Statistician*, 2009 : http://bit.ly/10xTouq

SCIENCE & FICTION

Le fantasme de l'invisibilité

Pour être invisible, un objet ou un organisme vivant doit être transparent et ne pas réfléchir la lumière. Différentes techniques sont à l'étude, mais aucune n'est parfaite. Ce qui n'empêche pas certains cinéastes de jouer avec l'invisibilité de leurs personnages.

Roland LEHOUCQ et J. Sébastien STEYER

Pourquoi le désir d'invisibilité est-il si fort et si présent dans l'inconscient collectif, dans la littérature et dans les films ? Vraisemblablement parce que l'invisibilité fait disparaître les contraintes sociales et morales. Pouvant échapper à tout châtiment, l'homme invisible devient un danger pour la société.

C'est d'ailleurs le sujet de la fable de Gygès, contée par Platon au début du II^e^ livre de *La République*. Gygès, simple berger de Lydie, découvre par hasard un anneau qui lui permet de se rendre invisible tout en conservant la faculté de voir et d'entendre ce qui se passe autour de lui. Grâce à ce pouvoir, il se rend au palais royal, séduit la reine, complote avec elle et assassine le roi pour s'emparer du pouvoir. Cette expérience de pensée permet à Platon de discuter de ce qu'est un homme juste et des motivations de la moralité.

C'est une histoire voisine que raconte H. G. Wells dans son roman *L'Homme invisible* (1897), où le chimiste Jack Griffin découvre un sérum d'invisibilité et le teste sur lui. Jouissant de ce pouvoir, il commet vols et crimes, s'enfermant dans une spirale infernale qui le conduira à la mort. Souvent, l'invisibilité est un superpouvoir qui se paie cher, comme l'apprendront aussi Bilbo, puis son neveu Frodon, en utilisant l'Anneau Unique de Sauron dans les œuvres de J. R. R. Tolkien (*Bilbo le Hobbit*, 1937, et *Le Seigneur des Anneaux*, 1954-55).

Quant aux méthodes conférant l'invisibilité, elles varient de la magie jusqu'aux procédés techniques les plus élaborés. Côté magie, Harry Potter et sa cape d'invisibilité viennent immédiatement à l'esprit. Pour le reste, les exemples foisonnent. Ainsi, Jane Storm, membre des *Quatre Fantastiques* (*Marvel Comics*, 1961), peut se rendre invisible à volonté après avoir été irradiée accidentellement par des rayons cosmiques durant une expédition spatiale. Dans la série américaine *L'homme invisible*, datant de 1975, le savant Daniel Westin met au point une « machine à rayons » capable de rendre les objets invisibles et qu'il s'applique à lui-même. Plus près du mimétisme, le major Kusanagi est une cyborg du manga *Ghost in the shell* dotée d'un camouflage « thermo-optique » qui n'est pas sans rapport avec l'armure de l'affreux extraterrestre du film *Predator*, qui renvoie la lumière pour annuler le contraste avec son environnement.

1. L'HOMME INVISIBLE a été le héros de très nombreux romans, films, séries télévisées ou bandes dessinées !

Des solutions pour se rendre invisible

Quittons le domaine de la fiction pour nous poser la question de l'invisibilité sur Terre. Nous constatons que de nombreux animaux (céphalopodes, arthropodes ou caméléons) disposent de différents types de camouflages ou autres mimétismes, qui ont été sélectionnés au cours de l'évolution. En effet, ils leur confèrent un avantage lors de la chasse ou pour passer inaperçus aux yeux de leurs prédateurs. Ces stratégies sont rendues possibles notamment grâce à des cellules pigmentaires de la peau (les chromatophores

et les iridophores) qui réfléchissent différemment la lumière. Par ailleurs, l'imagerie médicale rend le corps quasi transparent, et les physiciens fabriquent des capes d'invisibilité.

La première solution pour disparaître aux yeux des humains consiste à ne pas absorber la lumière visible : l'objet est transparent. Mais la transparence ne garantit pas l'invisibilité. Bien qu'une faible épaisseur d'eau ou de verre n'absorbe quasiment pas la lumière visible, nous voyons la surface d'une goutte d'eau ou celle d'une vitre parce qu'elles réfléchissent une partie de la lumière incidente. Cette réflexion est inévitable, car elle est due à la différence entre l'indice optique du milieu (ici l'eau ou le verre) et celui de l'air. L'indice optique de la matière biologique étant plus proche de celui de l'eau que de celui de l'air, il est plus facile de limiter les réflexions – et donc de devenir invisible – dans l'eau que dans l'air.

C'est le cas de certains organismes marins, tels que les méduses ou les poissons des abysses : ils passent *incognito*, d'une part, car leurs tissus sont transparents et, d'autre part, car la lumière est faible à grande profondeur. D'autres espèces – manchots, cétacés ou requins – ont le dos beaucoup plus sombre que le ventre, de sorte que leur corps se confond soit avec la surface de l'océan quand ils sont observés de dessus, soit avec le ciel quand on les voit de dessous.

Les réflexions étant évitées, il reste à se prémunir contre la diffusion de la lumière. Pour qu'un tissu biologique évite au mieux la diffusion, il doit être organisé de façon homogène sur des distances comparables aux longueurs d'onde de la lumière visible. C'est possible, comme l'illustre la cornée de l'œil qui est transparente grâce à un arrangement parfaitement régulier des fibres de collagène qui la composent. Mais c'est également rare, car les proportions et les propriétés optiques des composants des tissus biologiques varient notablement.

Pour étudier un squelette ou des tissus, la technique classique consiste à tremper l'animal dans différents bains (contenant notamment des enzymes, de l'alcool et des colorants), afin de rendre les chairs invisibles et de colorer les tissus que l'on souhaite observer (par exemple, le cartilage et les os). Une équipe américaine de l'Université Stanford a récemment réussi à rendre transparent le cerveau d'une souris en le plongeant dans un bain d'hydrogel, une substance similaire à celle dont sont constituées les lentilles jetables. Les molécules de ce gel ont pénétré dans les tissus, formant une armature souple et transparente ; les lipides cellulaires opaques à la lumière ont été éliminés. Cette technique a permis d'obtenir des clichés incroyablement précis de l'architecture moléculaire du cerveau.

2. L'ARTISTE peut rendre un être humain transparent. Dans la réalité, même si diverses techniques sont aujourd'hui à l'étude, l'invisibilité reste un mythe.

Du naturel à l'artificiel

Il existe d'autres façons de créer l'invisibilité. Si vous branchez une *webcam* qui filme très précisément l'arrière-plan de votre écran d'ordinateur, et si vous adaptez précisément l'image à la taille de votre écran, vous aurez l'impression que votre écran est devenu invisible ! Malheureusement, ce procédé ne fonctionne que selon la direction perpendiculaire à l'écran. Un étudiant japonais de l'Université de Tokyo, Kazutoshi Obana, a perfectionné cette idée. Une caméra filme l'arrière-plan d'une personne et l'image obtenue est projetée sur l'avant de l'individu. Pour que l'illusion soit parfaite, il faut que le sujet porte un manteau couvert de milliers de minuscules réflecteurs sphériques dont la partie postérieure est réfléchissante. En renvoyant chaque rayon lumineux dans sa direction d'arrivée, ce manteau *high-tech* donne l'illusion que celui qui le porte est transparent. Comme pour l'écran d'ordinateur, le seul défaut de ce spectaculaire procédé de camouflage optique est qu'il n'est efficace que dans une seule direction.

En octobre 2006, David Smith et ses collègues de l'Université Duke, en Caroline du Nord, ont réussi à rendre un objet réellement invisible. Pas invisible à la lumière du Soleil, mais dans la gamme des micro-ondes. D'habitude, les engins furtifs absorbent l'énergie électromagnétique incidente ou la renvoient grâce à la forme particulière de leur fuselage. Les Américains ont utilisé des métamatériaux (dont l'indice de réfraction est négatif) pour construire un dispositif capable de forcer les rayons lumineux à contourner un objet, un peu comme l'eau s'écoule autour d'un galet. Les rayons ne sont ni absorbés ni renvoyés par l'objet, de sorte qu'il devient invisible. En raison des contraintes de fabrication, l'équipe américaine a dû utiliser des micro-ondes. Mais, en principe, ce qu'ils ont réalisé pour les micro-ondes pourrait l'être pour les ondes visibles. Les recherches s'orientent aujourd'hui vers des matériaux invisibles dans la partie visible du spectre lumineux.

On le voit, la science rattrape une fois encore la fiction, et la voiture invisible de James Bond sera peut-être un jour accessible à tous. Mais cela ne deviendrait intéressant que si son conducteur était, lui aussi, invisible ! ■

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

www.boundscience.fr

ART & SCIENCE

Entre le vivant et l'inerte

Plusieurs designers s'inspirent de la biologie pour concevoir des objets, réalistes ou provocants, qui transformeront – peut-être – notre quotidien. Leur motivation est de repenser notre relation à la nature.

Loïc MANGIN

Le biomimétisme a le vent en poupe depuis plusieurs siècles. Chimistes, physiciens, ingénieurs et biologistes s'associent pour observer et décrypter les phénomènes vivants afin de s'en inspirer pour créer de nouveaux matériaux ou processus. C'est d'autant plus vrai aujourd'hui que certains y voient un moyen de faire face aux enjeux environnementaux. Le biomimétisme serait un moyen, parmi d'autres, de passer d'une économie fondée sur le carbone (polluante et gourmande en énergie et en ressources naturelles) à une économie plus « verte ». En d'autres termes, l'observation du vivant aiderait à protéger… le vivant, y compris l'humanité.

Les exemples de biomimétisme sont légion. L'un des plus connus est la tentative de Léonard de Vinci d'imiter le vol des oiseaux pour concevoir une machine volante. Le velcro est inspiré des crochets de la bardane. Des pare-brise sont rendus autonettoyants grâce à la compréhension des propriétés hydrophobes des feuilles de lotus.

L'art n'est pas en reste, et notamment le design – cet art appliqué dont le but est de résoudre un problème lié à l'usage, la forme d'un objet, la technique mise en œuvre pour le fabriquer… La Fondation EDF propose une exposition consacrée aux œuvres de designers qui travaillent avec des matériaux et des techniques issus du vivant. En voici quelques pièces représentatives.

La Britannique Eleine Ng Yan Ling, dans le cadre de son projet *Techno Naturology*, a conçu des textiles fondés sur les matériaux à mémoire de forme associés à du bois et à des fibres naturelles *(voir la figure a)*. Le résultat est un tissu qui imite le comportement d'une pomme de pin : il est sensible aux écarts de température et à l'humidité. On peut alors imaginer des revêtements qui laissent passer la lumière l'hiver et protègent du soleil l'été. Autre exemple, des vêtements et des accessoires qui changent de forme selon l'environnement.

Pour pallier le manque de matériaux, sable pour le béton ou bois, Philip Ross a une solution : utiliser des champignons !

Le Français Vincent Fournier s'est placé dans un futur imaginaire où la biologie de synthèse aurait conquis notre quotidien. Il a imaginé un drone en forme de méduse *(voir la figure b)*. Ce robot, mi-vivant, mi-machine, serait immergé dans les rivières et en sortirait pour survoler des zones victimes de sécheresses localisées et y larguer l'eau qu'il contient. Activé par des températures supérieures à 30 °C, il serait guidé à partir des informations recueillies par des satellites de surveillance.

Le 29 mai 2013, l'Assemblée nationale a été alertée d'une possible pénurie de sable, indispensable à la confection du béton. Certaines essences de bois se font rares. Pour pallier ces manques et continuer à construire des meubles ainsi que des bâtiments, l'Américain Philip Ross propose d'utiliser les champignons ! L'idée consiste à cultiver sur de la sciure ces organismes qui, en consommant la cellulose du substrat, le solidifie. On obtient alors, après séchage, un matériau léger et résistant dont on peut faire, par exemple, une chaise *(voir la figure c)* ou des briques.

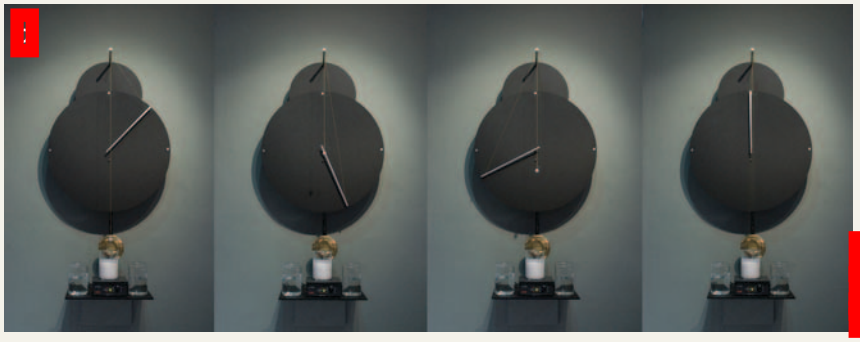
Le Français Emile de Visscher a élaboré une méthode, nommée *Pearling*, pour faire pousser chez soi des perles. La nacre est un empilement régulier de couches de cristaux d'aragonite (un carbonate de calcium) autour d'un germe, par exemple un grain de sable. Le principe mis au point par le designer est calqué sur cette structure : un objet est plongé et retiré de façon périodique dans un bain de matières polarisées dispersées dans de l'eau *(voir la figure d)*. À chaque cycle, une mince couche se dépose, et l'on peut imaginer transformer ainsi n'importe quel objet en bijou.

Enfin, dernier projet, celui de la Britannique Shamees Aden. Il s'agit d'une chaussure qui s'adapte automatiquement à la surface du terrain *(voir la figure e)*. Son secret ? Elle est constituée de protocellules, à la frontière du vivant et de l'inerte, qui réagiraient à l'activité du coureur.

Plusieurs de ces idées sont déjà mises en œuvre concrètement. D'autres n'existent que pour provoquer l'imagination. Mais n'est-ce pas ce dont nous avons besoin ? ■

En vie/Alive, aux frontières du design, Espace Fondation EDF, 6 rue Récamier, 75007 Paris.

© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013



IDÉES DE PHYSIQUE

Les mélodies du café soluble et de l'hélium

On peut modifier un bruit ou une voix en jouant sur les paramètres qui déterminent la vitesse de propagation du son.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

La voix d'un scaphandrier en plongée profonde, qui respire un mélange à base d'hélium, devient aiguë et nasillarde ; lors de la préparation d'une boisson instantanée, café ou chocolat, la hauteur du son émis par la cuillère qui frappe la tasse change progressivement. À quoi sont dues ces modifications sonores ? Elles ne proviennent pas du raccourcissement d'une corde, comme pour un violon, ou d'un changement de la longueur active d'un tuyau, comme pour une flûte. Tant pour le plongeur que pour la tasse, c'est le changement de la vitesse du son qui est à l'œuvre.

Un air d'effervescence

Allons en cuisine pour expérimenter cet effet et comprendre son origine. Prenons un verre cylindrique et tapotons le fond avec une petite cuillère alors qu'il est encore vide. Répétons l'expérience après avoir rempli le verre d'eau. Le son émis est plus aigu. Pourquoi ?

En tapotant le fond du verre, nous mettons en vibration à la fois le matériau constituant les parois du verre et le fluide – air ou eau – qu'il contient. Ce sont les vibrations de ce fluide qui vont nous intéresser.

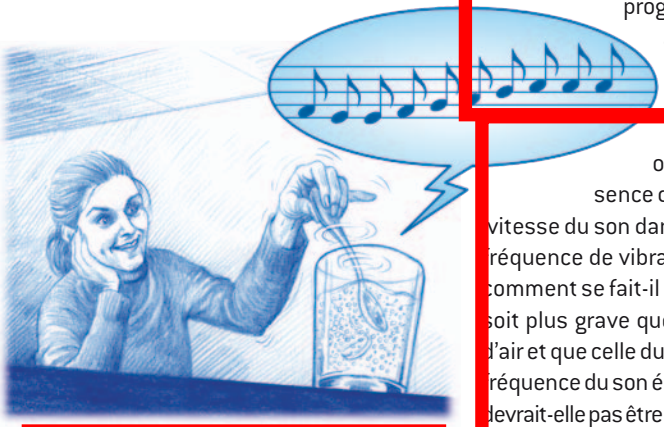
Supposons le verre haut et étroit (ce n'est pas essentiel pour l'expérience, mais cela simplifie l'explication). On a alors un tuyau ouvert à une extrémité et fermé à l'autre, semblable à de nombreux instruments de musique. Mise en mouvement par le choc de la petite cuillère contre le verre, la colonne de fluide ne vibre qu'à certaines fréquences, les fréquences de résonance. Dans notre cas d'un tube ouvert-fermé, il s'agit des multiples impairs de la fréquence fondamentale, égale au quotient de la vitesse du son dans le fluide sur quatre fois la hauteur du tube.

Pour un verre haut de dix centimètres et rempli d'air, la fréquence fondamentale est de l'ordre de 800 hertz. La vitesse du son dans l'eau, 1 500 mètres par seconde, étant près de cinq fois plus élevée que dans l'air (330 mètres par seconde), les fréquences de vibration sont dans le même rapport. Ainsi, avec un verre plein d'eau, les vibrations ont une fréquence de 3,8 kilohertz et le son émis est plus aigu de plus de deux octaves.

Versons maintenant dans le verre plein d'eau un peu de poudre de pastille effervescente écrasée et agitons avec la petite cuillère en prenant soin de faire tinter le verre en même temps. Lorsque les premières bulles apparaissent, le son émis devient plus grave, bien plus grave même qu'avec le verre vide. Puis, à mesure que les bulles disparaissent, le son remonte progressivement dans les aigus jusqu'à rejoindre le son du verre plein *(voir la figure 1)*.

Qualitativement, on comprend que la présence des bulles a modifié la vitesse du son dans le fluide, et donc la fréquence de vibration de celui-ci. Mais comment se fait-il que la note entendue soit plus grave que celle du verre plein d'air et que celle du verre plein d'eau ? La fréquence du son émis par le mélange ne devrait-elle pas être une sorte de moyenne des deux ?

Pour comprendre ce qui se passe, nous devons analyser plus en détail les paramètres qui influent sur la vitesse à laquelle se propage le son. Considérons un long ressort à boudin, modèle macroscopique qui aide à visualiser les phénomènes



1. LORSQU'ON AGITE LA CUILLÈRE dans un verre d'eau où l'on a immergé un cachet effervescent, la hauteur du son produit diminue avant d'augmenter. La présence des bulles modifie la compressibilité du liquide et, de ce fait, la vitesse du son dans ce milieu – d'où les changements de la hauteur du bruit créé par la cuillère.

physiques en jeu *(voir la figure 2)*. À une extrémité, créons une onde en poussant rapidement le ressort et en ramenant la main à sa position initiale. Lorsque nous poussons, le ressort ne se déplace pas en bloc. Notre main comprime les premières spires, ce qui transmet la force que nous exerçons aux spires suivantes, lesquelles vont se mettre en mouvement et comprimer la suite du ressort. L'ébranlement se propage ainsi de proche en proche.

Masse volumique, compressibilité et vitesse du son

La vitesse de propagation dépend de l'efficacité avec laquelle la force est transmise de proche en proche et de la facilité à mettre en mouvement la matière dont est fait le ressort. Plus le milieu est compressible, moins la force correspondant à une compression donnée est importante et moins le ressort se met rapidement en mouvement. Par ailleurs, plus le ressort est massif, plus son inertie est élevée et moins rapide est sa mise en mouvement.

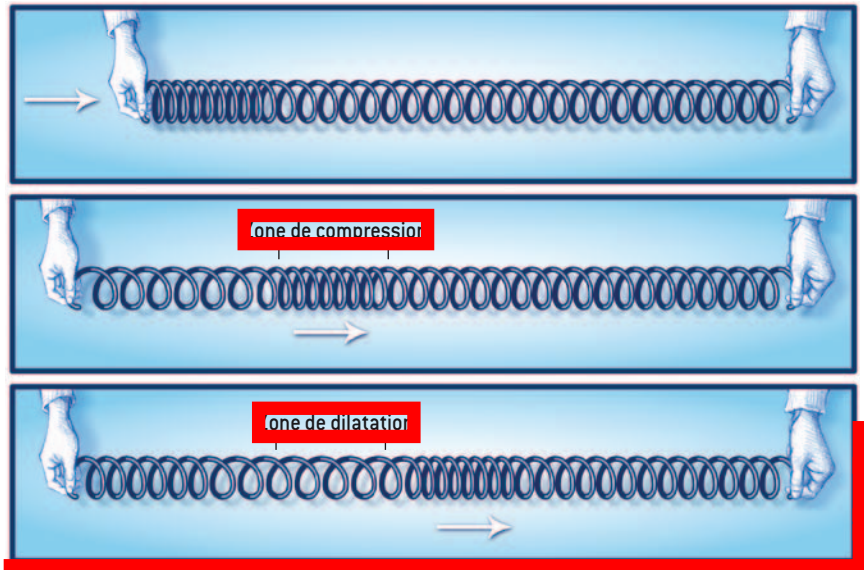
Plus précisément, la vitesse du son dans un fluide (où les molécules remplacent les spires du modèle) est inversement proportionnelle à la racine carrée du produit de la masse volumique et de la compressibilité. L'air étant environ 800 fois moins dense que l'eau, mais environ 15 000 fois plus compressible dans des conditions normales de pression, on retrouve le fait que le son s'y propage à une vitesse près de cinq fois inférieure.

Qu'advient-il dans de l'eau faiblement gazeuse ? La présence des bulles d'air ne change pas beaucoup la masse volumique du mélange ; avec 0,5 pour cent de bulles en volume, sa densité reste pratiquement égale à celle de l'eau pure (1 kilogramme par litre). Les bulles, en revanche, ont un impact majeur sur la compressibilité. Sous pression modérée, l'eau liquide est peu compressible, donc change à peine de volume, mais ce n'est pas le cas des bulles. Si l'on augmente la pression de 20 pour cent, le volume des bulles diminue d'autant à température fixée, et le volume du mélange est réduit de 0,1 pour cent. Cela paraît peu : la compressibilité est alors 200 fois inférieure à celle de l'air, mais 25 fois supérieure à celle de l'eau pure ! La masse volumique étant presque inchangée, la vitesse du son est divisée par neuf environ et il en est de même de la fréquence fondamentale dans le verre cylindrique.

Nous sommes désormais en mesure d'interpréter l'expérience. Au tout début, le morceau de pastille effervescente libère des bulles dans l'eau. La vitesse du son chute tant que la concentration de bulles augmente, c'est-à-dire tant qu'il apparaît plus de bulles qu'il n'en disparaît à la surface. La fréquence fondamentale devient plus grave et ne remonte vers celle du verre rempli d'eau plate qu'une fois l'effervescence terminée.

En pratique, il faut mettre peu de matériau effervescent pour produire la variation de fréquence sonore la plus spectaculaire. L'effet s'obtient aussi en préparant un café ou un chocolat instantané : quand vous tapotez sur le verre, l'air piégé sur la poudre se libère et crée les bulles responsables du changement de son.

Plutôt que de modifier la compressibilité du fluide, on peut jouer sur son inertie.



2. LA PROPAGATION DU SON DANS UN FLUIDE est analogue à la propagation d'une onde de compression le long d'un ressort à boudin. Moins le ressort est raide, plus il est compressible, et moins l'onde se propage rapidement. De même, plus le ressort est massif, moins l'onde est rapide. De façon analogue, la vitesse du son dans un fluide est inversement proportionnelle à la racine carrée du produit de sa compressibilité par sa masse volumique.

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

BIBLIOGRAPHIE

S. Planinsic et E. Etkina, **Bubbles that change the speed of sound**, *Physics Teacher*, vol. 50, pp. 458-460, 2012.

F. S. Crawford, **The hot chocolate effect**, *American Journal of Physics*, vol. 50(5), pp. 398-404, 1982

Retrouvez les articles de J.-M. Courty et É. Kierlik sur

www.pourlascience.fr

3. DANS L'HÉLIUM, la vitesse du son est environ le triple de ce qu'elle est dans l'air. De ce fait, les fréquences de résonance d'un instrument ou d'un conduit vocal sont décalées vers l'aigu. C'est pourquoi la voix d'une personne inhalant de l'hélium, ou un mélange à base d'hélium, est déformée et fait penser à celle d'un canard.

Des gaz de compositions différentes ont presque la même compressibilité, mais des masses volumiques différentes. On peut refaire l'expérience précédente en choisissant notre bouche et notre gorge comme récipient jouant le rôle de résonateur, nos cordes vocales comme producteur de son, et divers gaz comme fluide.

Si l'on inhale de l'hélium, gaz environ sept fois moins dense que l'air et où la vitesse du son est d'environ 970 mètres par seconde, les fréquences de résonance dans nos conduits vocaux s'élèvent alors dans l'aigu pour donner une voix nasillarde caractéristique, proche de celle de Donald Duck ! L'hexafluorure de soufre (SF_6) – un gaz inerte, incolore et inodore – est cinq fois plus dense que l'air et la vitesse du son y vaut 146 mètres par seconde. Si l'on en inspire, la voix devient plus grave.

Sur Internet, de multiples vidéos illustrent ces effets. Au-delà de l'aspect ludique, ce phénomène a des conséquences pour les plongeurs des profondeurs (au-delà de quelques dizaines de mètres). Pour éviter qu'il y ait trop d'azote dissous dans le sang, ce composant de l'air est remplacé en partie ou totalement par de l'hélium. Un mélange utilisé est par exemple le trimix, constitué de dioxygène, de diazote et d'hélium dans des proportions telles (25 pour cent d'hélium) que la voix en est effectivement modifiée *(voir la figure 3)*.

Cela ne facilite pas la communication, indispensable pour des questions de sécurité. Le problème est suffisamment sérieux pour que les ingénieurs développent des logiciels de traitement de la parole, afin de corriger ces voix de canards des profondeurs et rétablir leur intégrité. ■

© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013

SCIENCE & GASTRONOMIE

Pelures toxiques

Le mythe de la bonne nature fait oublier que les végétaux comestibles, telle la pomme de terre, savent se défendre contre leurs agresseurs.

Hervé THIS

Dans la grande guerre du « bio » contre la chimie, tout parti que l'on prend est mauvais. D'un côté, critiquer les pratiques du bio, ou même seulement l'agriculture biodynamique, c'est être considéré comme un suppôt de l'industrie chimique ; certes, cette dernière a ses défauts, mais elle produit les spécialités qui permettent d'éviter efficacement les dégâts des ravageurs. De l'autre, critiquer l'industrie, c'est se voir accusé de faire partie d'un groupe obscurantiste. Dans les deux cas, les arguments détaillés ne sont pas de mise.

Il ne reste donc qu'un parti, celui de la science quantitative. Sans chercher à convaincre, elle produit des faits, lesquels peuvent être proposés à ceux qui peuvent les écouter, ceux dont le jugement n'est pas aveuglé par les raisons économiques (la chimie, c'est une grosse industrie ; le bio, c'est un énorme marché). Tout ce préambule pour arriver à des dosages effectués sur les pommes de terre, et qui montrent que nous ferions bien de ne pas oublier leur origine botanique et les hésitations d'antan concernant leur consommation.

Commençons par les hésitations : quand Antoine Parmentier milita pour introduire la pomme de terre dans l'alimentation des Français, un peu avant la Révolution, l'Académie de médecine refusait les tubercules, qui étaient même accusés de donner la lèpre. Parmentier, toutefois, avait voyagé en Allemagne, comme pharmacien des armées, et il avait vu que la plante résistait mieux que le blé aux climats froids, tels ceux associés à un petit âge glaciaire.

A force d'études, de repas prosélytes où le roi de France fut un allié, la pomme de terre s'introduisit, mais on gardait quelques doutes. Et l'on évitait soigneusement de manger la peau, surtout pour les pommes de terre verdies ou germées. Tout cela semble oublié, et nombre de chefs étoilés font aujourd'hui des frites, par exemple, en conservant la peau, qui ajoute un croustillant agréable. Un exemple de conseil : « Les pommes de terre cuites avec leur peau, qu'elles soient préparées à la vapeur, bouillies ou encore cuisinées au four à micro-ondes ou en robe des champs, conservent davantage de vitamines, de minéraux et de goût que celles qui sont épluchées. La différence au niveau gustatif est énorme ! Les qualités nutritionnelles également ! De plus, cuire les pommes de terre avec la peau facilite la vie. »

Que penser de ces indications, données de surcroît sur un site Internet « santé » ? Lisons les résultats des études récentes d'A. Aziz, T. Shibamoto et leurs collègues des Universités de Faisalabad (Pakistan) et de Davis (États-Unis). Ces chimistes se sont intéressés à deux glycoalcaloïdes (ce sont des défenses de la plante contre les ravageurs) présents dans la partie superficielle des pommes de terre : la solanine et la chaconine.

Ces deux composés sont thermorésistants : ils restent actifs après cuisson des pommes de terre, et résistent même à 285 °C. Ils provoquent gastro-entérites, diarrhées, vomissements, fièvres, modifications de la pression sanguine, syndromes neurologiques, et peuvent même tuer l'homme ou l'animal. Les autorités sanitaires ont proposé une limite de consommation de 200 milligrammes par kilogramme de pommes de terre : il a été montré que, quand la concentration en solanine est supérieure à 140 milligrammes par kilogramme, l'alcaloïde provoque un goût amer, une sensation de brûlure et, pour l'espèce humaine, la dose fatale est de trois à six milligrammes par kilogramme de poids corporel.

Cette valeur est-elle parfois atteinte ? Évidemment, dans des études aussi importantes socialement et économiquement, le protocole expérimental a été soigné. Ainsi, le jour de l'analyse, les tubercules ont été lavés, pelés à l'aide d'un économe domestique, qui retirait précisément les quelque trois millimètres sous la surface où les glycoalcaloïdes sont présents. Après une heure de cuisson dans l'eau bouillante, les pelures ont été analysées, les glycoalcaloïdes dosés... et les chimistes ont alors observé que la concentration limite recommandée était dépassée pour toutes les pommes de terre testées ! Que feront de cette information les chefs étoilés qui, parfois adeptes du bio et des produits « naturels », cuisent les pommes de terre avec leur peau ? ■

Hervé THIS est chimiste dans le Groupe INRA de gastronomie moléculaire, professeur à AgroParisTech et directeur scientifique de la Fondation Science & Culture Alimentaire (Académie des sciences).

Retrouvez les articles de H. This sur www.bourdscience.fr

PHYSIQUE

Higgs Le boson manquant

Sean Carroll
Belin, 2013
(400 pages, 22 euros).

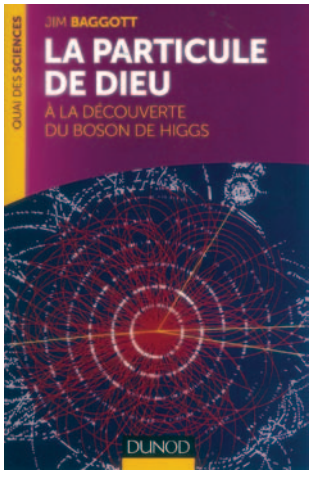
La particule de Dieu

Jim Baggott
Dunod, 2013
(256 pages, 19 euros)

L'annonce récente de la découverte d'une nouvelle particule qui a de grandes chances d'être le boson de Higgs a dernière particule élémentaire qui échappait depuis des décennies aux physiciens expérimentateurs, a encouragé la publication de plusieurs ouvrages de vulgarisation sur ce sujet pointu et sur la physique des particules en général. Certains se distinguent par leur réelle volonté de toucher un public large et d'expliquer l'importance de ce domaine de recherche.

Sean Carroll, physicien théoricien à Caltech (Californie), nous invite à parcourir le dédale de la théorie quantique des champs, l'une des théories physiques les plus complexes du point de vue technique et conceptuel, dont il est un des experts mondiaux. C'est cette théorie qui fournit aujourd'hui la description la plus précise du monde subatomique et qui a permis de prédire l'existence du boson de Higgs. S. Carroll la présente avec une légèreté surprenante et avec beaucoup d'humour, soulignés par plusieurs dessins de Lison Bernet tirés du blog *La BD du LHC*.

L'ouvrage se lit comme un roman, avec une intrigue et des protagonistes humains – les scientifiques – que l'auteur sait rendre attachants. Et pourtant, à aucun moment S. Carroll n'hésite à s'engager dans des explications sur des points de physique subtils et délicats. Il aborde notamment de front la notion d'invariance de jauge (un point technique crucial en théorie quantique des champs), ainsi que la différence entre le boson de Higgs, le champ de Higgs et le mécanisme de Higgs, trois notions intimement reliées mais bien distinctes. Ses points de vue sur l'intérêt de la recherche fondamentale pour la société dans son ensemble sont aussi très éclairants. Il nous rappelle notamment que, certes, les retombées pratiques de la recherche fondamentale sont nombreuses (la mention des travaux de l'économiste Edwin Mansfield fournit une piste très riche sur l'importance de la recherche universitaire en termes de retombées industrielles), mais que c'est avant tout un idéal, l'approfondissement de la compréhension des lois de la nature par et pour l'humanité, qui fait avancer et doit continuer à faire avancer les chercheurs. Le parcours proposé est truffé de petits détours inattendus (*Legoland*, Angelina Jolie, l'expérience coca-mentos...) : S. Carroll n'est pas qu'un physicien brillant et un excellent pédagogue, c'est aussi un conteur hors pair !



L'ouvrage de Jim Baggott, scientifique et journaliste scientifique britannique, démarre sur un malaise : le titre français choisi par l'éditeur, *La particule de Dieu*, corrigé par son sous-titre *À la découverte du boson de Higgs*, laisse perplexe. Pourquoi diable l'éditeur français a-t-il jugé bon de surenchérir sur le titre original (qui ne mentionnait «God particle» que dans le sous-titre, entre guillemets) alors que la préface mentionne que les scientifiques détestent ce terme ? C'est d'autant plus curieux que l'ouvrage présente une vision par ailleurs très juste de la recherche dans le domaine, au plus près des préoccupations des scientifiques.

La fausse note sur laquelle démarre l'ouvrage ne doit pas décrédibiliser d'emblée l'entreprise toute entière – ce serait passer à côté d'un livre d'excellente qualité aussi. Le point de vue adopté est franchement historique. L'ouvrage présente la genèse des théories de la physique des particules depuis le début du XX^{e} siècle, de manière détaillée et documentée. La découverte du boson de Higgs est replacée dans le contexte d'une longue série de questionnements, d'avancées, d'impasses et de découvertes, à la fois théoriques et expérimentales. L'influence du contexte politique et économique sur les décisions scientifiques qui ont mené à la conception du LHC, le collisionneur qui aura finalement permis de découvrir le boson de Higgs, ou à l'abandon du SSC, le projet de collisionneur américain qui aurait pu le faire plusieurs années auparavant, est décrite de façon passionnante. L'auteur apporte un grand nombre d'anecdotes sur les hommes politiques impliqués et sur les scientifiques du domaine, qui rendent l'ouvrage très plaisant à lire, lui aussi.

Les deux ouvrages sont finalement complémentaires et leur lecture donnera une vue d'ensemble complète de la recherche en physique des particules.

→ Richard Taillet
Université de Savoie

SCIENCE ET SOCIÉTÉ

ADN superstar ou superflic ?

Catherine Bourgain et Pierre Darlu
Seuil, 2013
(167 pages, 19 euros)

Précipité dans un tube à essai, l'ADN apparaît comme un amas de filaments blanchâtres. Seul il ne fait rien. Il doit

es extraordinaires pouvoirs qui ui sont attribués à des escouades de protéines capables d'animer et de mettre en musique la partition nucléotidique. Il en va de même dans l'espace public. L'ADN constitue un acquis fondamental des connaissances en biologie, un savoir objectif dénué de toute connotation déologique ou affective. Pourtant, orsque ce savoir est relayé, amplifié, marchandisé et orchestré par es acteurs de la société civile, se construit dans l'inconscient collectif une image déformée, parasitée par les présupposés et les messages ronqués. On quitte alors le domaine de la science pour entrer dans celui des représentations, du commerce de diagnostics et de prédictions bon marché. À travers de nombreux

© Pour la Science - n° 429 - Juillet 2013

exemples concrets, les auteurs de cet essai tirent le portrait d'une « molécule encombrante » qui s'insinue par effraction jusque dans notre intimité, n'épargnant pas plus les individus que les familles ou les communautés.

Sous un titre un brin racoleur, les auteurs, deux généticiens des populations, dressent un bilan documenté dans quatre domaines spécifiques : l'utilisation policière des empreintes génétiques, les possibilités d'établir un phénotype morphologique à partir du génotype, la généalogie et les applications médicales. En partie conditionné par la discipline des auteurs, le choix thématique n'en est pas moins judicieux par ses implications économiques, sociales, et son impact sur l'opinion publique.

Dans nombre de débats sensibles qui agitent nos sociétés en crise (filiation, identité, racisme, fichage, libertés individuelles, etc.), l'ADN tend à prendre le pas sur toute autre analyse, politique, sociologique, historique ou ethnologique. Il est en effet plus facile de séquencer une structure répétitive que de démêler l'écheveau d'interactions complexes entre de multiples dimensions allant du culturel au biologique.

Pourtant, 60 ans après sa découverte, l'ADN ne parle plus la langue du déterminisme, mais celle des probabilités difficile à retranscrire en langue vernaculaire. Comment interpréter les résultats d'un « test d'orientation généalogénétique » acheté sur Internet qui situe l'origine de vos gènes à 46 pour cent en Europe du Sud, 28 pour cent en Europe du Nord, 21 pour cent en Asie et 5 pour cent en Afrique du Nord ? Le vernis scientifique de ce type de conclusions donne trop souvent lieu à des interprétations essentialistes qui n'ont pas lieu d'être.

Si l'ADN fait société, c'est par exclusion des valeurs qui, traditionnellement, tissent les liens entre citoyens. Au regard des approximations et des outrageuses simplifications finement disséquées dans ce livre salutaire, on assiste plus souvent à une réduction des questions et à une régression des analyses qui suggèrent que, pour l'heure, l'ADN défait plus sûrement le lien social qu'il ne le renforce.

→ Gérard Lambert
Centre Cavaillès, ENS, Paris

→ DÉBAT

De l'inerte au vivant. Une enquête scientifique et philosophique

Patrick Forterre, Louis d'Hendecourt, Christophe Malaterre et Marie-Christine Maurel,

La ville brûle, 2013
(256 pages, 20 euros)

Un biologiste, une biochimiste, un astrophysicien et un philosophe se sont associés pour composer cet ouvrage autour du thème auquel ils ont tous consacré leurs recherches, à savoir l'origine de la vie. Cette table ronde, animée par le journaliste scientifique Sylvestre Huet, leur donne l'occasion d'aborder les grandes questions que pose le passage de l'inerte au vivant. D'abord, des questions d'ordre purement scientifique : d'où est venue la matière organique initiale ? Quels scénarios imaginer pour la formation des premières cellules ? Comment étudier ces processus en laboratoire ? Quels enseignements tirer du métabolisme d'organismes actuels tels que les archéobactéries ? Puis viennent des interrogations plus en lien avec la société, comme la représentation du problème des origines dans le grand public, les politiques de recherches en ce domaine, l'éventualité de l'exploration spatiale...

Le grand intérêt de ce livre réside dans le style vivant que lui donne sa forme dialoguée et la façon, quasi autobiographique, dont chacun des protagonistes présente

son approche de la question. Cet artifice littéraire ne nuit en rien à la qualité pédagogique de l'ouvrage. Les différents points sont abordés de façon claire, les faits, concepts et théories sont exposés méthodiquement par les interlocuteurs au fil de la conversation, ainsi que les voies de recherche, l'état actuel des connaissances et les perspectives.

Au-delà, la discussion fait apparaître des points de désaccord, qui ne traduisent pas seulement des

Brèves

Tout savoir sur l'eau du robinet

Agathe Euzen et Yves Levi (sous la dir.)

CNRS, 2013
(274 pages, 20 euros)

Quel est le circuit de l'eau du robinet ? Comment est-elle traitée, acheminée et distribuée ? Est-elle contaminée par des pesticides, des métaux lourds, des résidus médicamenteux, du plomb ? Qui est responsable de sa qualité ? Quelle réglementation l'encadre ? Risque-t-on une pénurie ? Au fil d'une quarantaine de mots d'entrée, c'est tout un monde que les auteurs, chercheurs d'horizons variés (chimie, pharmacie, hydrologie, géographie, agronomie, économie, sociologie, histoire…), présentent dans cet ouvrage clair et didactique : les dessous de l'eau potable.

L'archéologie en laboratoire

Stéphanie Thiébault et Pascal Depaepe (sous la dir.)

La découverte, 2013
(290 pages, 28,50 euros)

L'archéologie n'échappe pas à la transdisciplinarité. C'est ce que révèle ce recueil rassemblant 21 communications d'un colloque organisé en 2012 par la fondation EDF, Universcience et l'INRAP sur la recherche archéologique en laboratoire. En autant d'exemples concrets, les auteurs montrent les nombreuses études qu'entraîne une découverte archéologique sur le terrain : analyse, datation, reconstitution, interprétation… Et la diversité des compétences requises, puisque les recherches mêlent à l'archéologie, la physique, la chimie, la biologie, la génétique, la géologie ou l'anthropologie.

Dictionnaire historique et critique du racisme

Pierre-André Taguieff

PUF, 2013
(2032 pages, 49 euros)

En 540 articles, ce dictionnaire a pour objectif de fournir les repères historiques et les connaissances pour comprendre les multiples visages du racisme. En proposant aussi une histoire de la lutte contre le racisme, il offre de nouveaux éclairages sur les débats et controverses qui entourent la notion de race.

Brèves

Requins
Au-delà du malentendu

Robert Calcagno
Éditions du Rocher, 2013
(142 pages, 19,90 euros).

Bien loin du stéréotype de tueur impitoyable des *Dents de la mer*, les requins sont des animaux fascinants, dont l'avenir est cependant sombre. Victimes de la pêche, ils voient aussi leurs proies disparaître dans les filets des pêcheurs. L'auteur dénonce dans cet ouvrage les préjugés à propos de ce prédateur des océans, qui a un rôle clef dans l'écosystème marin. Il propose des pistes pour que l'homme cohabite avec le requin, animal si important pour l'équilibre écologique des océans.

La cryptologie
L'art des codes secrets

Philippe Guillot
EDP Sciences, 2013
(182 pages, 22 euros).

Comment protéger ses données confidentielles, ses transactions bancaires ou ses conversations téléphoniques ? Voilà tout l'art de la cryptologie. Des méthodes les plus anciennes aux plus modernes, tel le procédé RSA, l'auteur présente de nombreuses techniques et leurs applications dans notre vie quotidienne. Il évoque aussi les avancées de demain, fondées sur la mécanique quantique. La cryptologie n'est pas une science figée, puisque chaque méthode de protection est attaquée. Pour bien comprendre les enjeux, l'auteur se place aussi du côté de ceux qui tentent de casser les codes.

L'énergie à découvert

Rémy Mosseri
et Catherine Jeandel (dir.)
CNRS Éditions, 2012
(345 pages, 39 euros).

L'énergie est l'un des enjeux les plus importants de notre siècle. Mais comment s'y retrouver entre les sources actuelles, les pistes pour demain, le stockage, les approches pour réduire notre consommation ? Plus d'une centaine d'experts ont contribué aux 130 articles de cet ouvrage pour nous éclairer sur les différentes facettes de la question énergétique. Le grand public a ainsi accès à une mine d'informations, de bilans et de données, qui lui donneront une meilleure vision de ce sujet crucial et des arguments associés, souvent évoqués, mais peu expliqués.

divergences d'opinion personnelles, mais parfois aussi des différences culturelles entre les disciplines. Par exemple, la biochimiste rejette la notion de « vie », trop métaphysique et trop attachée à « une norme dominante excluant d'emblée la biodiversité inhérente aux origines de la vie » et lui préfère celle de « vivant », mieux ancrée dans la « réalité matérielle, dynamique, métabolique, réplicative, héréditaire... » ; en revanche, l'astrophysicien revendique la possibilité de travailler sur un concept de vie « opérationnel » et simple, fondé sur un petit nombre de propriétés physiques accessibles à l'expérience.

De même, là où le philosophe, qui répugne à l'idée d'un passage immédiat du non-vivant au vivant, privilégie des scénarios lents et continus, l'astrophysicien ne s'interdit pas de penser ce changement comme brutal et irréversible, recourant pour cela à la notion de « transition de phase » commune en sciences physiques. L'application de la notion de « darwinisme » aux premiers stades de la vie révèle également des avis divergents. Mais de telles tensions contribuent à enrichir le débat et démontrent en définitive la nécessité de l'approche interdisciplinaire adoptée.

→ Stéphane Schmitt
CNRS, Laboratoire SPHERE

→ HISTOIRE DES TECHNIQUES

Quoi de neuf ? Du rôle des techniques dans l'histoire globale

David Edgerton,
Seuil, 2013
(320 pages, 22 euros).

Qu'il faille renouer avec la croissance ou lutter contre le changement climatique, politiques et industriels de gauche comme de droite, répondent tous en cœur : « innovation ». Dans son ouvrage, l'historien des techniques David Edgerton offre un antidote contre ce concept creux qui anémie la pensée et le débat démocratique. Selon l'auteur, notre société cultive une obsession infantile et surannée pour l'innovation. Et l'histoire possède sa part de responsabilité : en reprenant avec paresse les discours des innovateurs eux-mêmes, elle propose le plus souvent des récits focalisés sur l'invention et les premiers usages, et laisse dans l'ombre le fait majeur que l'essentiel des objets techniques qui définissent les mondes productifs, militaires et sociaux à une époque donnée sont en réalité assez anciens.

À l'appui de son discours, D. Edgerton rappelle à la fois les techniques anciennes, simples et efficaces, encore d'usage aujourd'hui, et toutes les inventions mort-nées, présentées comme indispensables par des gourous publiés. En ce sens, l'histoire des techniques revue par D. Edgerton est libératrice : « Vivre à une époque inventive exige que nous rejetions la majorité de ce qui est proposé. Nous sommes libres de refuser les techniques que nous n'aimons pas. »

Et en déplaçant le regard vers l'ancien, vers ces vieilles techniques devenues comme une seconde nature, D. Edgerton parvient de surcroît à des résultats historiques neufs et contre-intuitifs : durant la Seconde Guerre mondiale, il y avait, dans la Wehrmacht lancée à l'assaut de l'URSS, 625 000 chevaux, soit bien davantage que dans la Grande Armée de Napoléon ; le projet Manhattan, acte de naissance de la *Big Science* ? Non : un projet d'envergure et de coût assez moyens du point de vue du corps des ingénieurs de l'armée américaine ; Auschwitz, une machine à tuer ultra-efficace, point d'orgue du projet modernisateur de rationalisation ? Non : rien de très impressionnant comparé aux grands abattoirs de Chicago ou de Buenos Aires.

Limiter l'apport de D. Edgerton à une critique de l'innovation serait donc réducteur. Son objectif n'est pas simplement de passer de « l'innovation aux usages, du grand au petit, du spectaculaire au trivial, du masculin au féminin du riche au pauvre ». En restaurant l'ancien, il entend « étudier la constitution matérielle de la société ». L'ambition est immense : en écrivant enfin une histoire empiriquement correcte des techniques, l'objectif n'est rien de moins que repenser l'histoire tout court.

→ Jean-Baptiste Fressoz
Imperial College, Londres

Retrouvez l'intégralité de votre magazine
et plus d'informations sur
www.pourlascience.fr

Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal 5536 – Juillet 2013 – N° d'édition 022429-01 – Commission paritaire n° 0912 K 82029 –
Distribution : NMPP – ISSN 0153-4092 – N° d'imprimeur 101782-536 – Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé

Et si vous choisissiez la stabilité du long terme plutôt que la fragilité du court terme ?

Quand une banque partage les valeurs de ses Sociétaires, leur confiance est réciproque et durable. Depuis 60 ans, la CASDEN s'engage, au quotidien, à leurs côtés afin qu'ils réalisent leurs projets en toute sécurité et aux meilleures conditions. Être une banque coopérative, c'est protéger avant tout les intérêts de ses Sociétaires.

Rejoignez-nous sur casden.fr ou contactez-nous au 0826 824 400

BANQUE POPULAIRE

L'offre CASDEN est disponible en Délégations Départementales et également dans le Réseau Banque Populaire

casden
BANQUE POPULAIRE

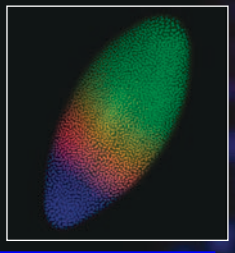
CASDEN, la banque coopérative de l'éducation, de la recherche et de la culture

● Avis de Tempête

MathWorks®
Accelerating the pace of engineering and science

Parlez-vous MATLAB?

Plus d'un million de personnes parlent MATLAB dans le monde.
Les scientifiques et les ingénieurs utilisent ce langage dans tous les domaines d'activités comme l'aérospatiale, les semi-conducteurs, les biotechnologies, les services financiers ou les géosciences.
Et vous, parlez-vous MATLAB ?



magerie de l'expressio
les gènes à haut débit
vec des données
le la base FlyEx.

xemple disponible su
nathworks.fr/ltc

MATLAB®

The language of technical computing