

■ POUR LA

SCIENCE

Novembre 2012 - n° 421

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

La conjecture ABC

Une énigme de la théorie
des nombres résolue ?

Les LED blanches

L'éclairage de demain

Exoplanètes

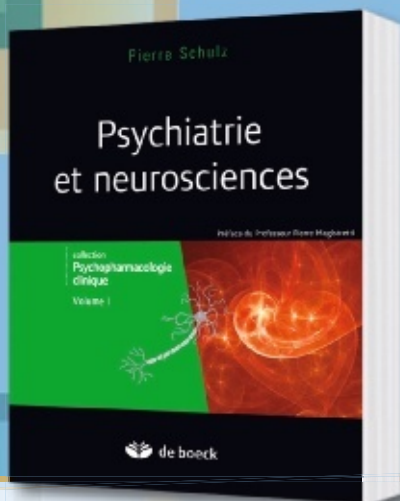
Quel temps y fait-il ?

DOSSIER

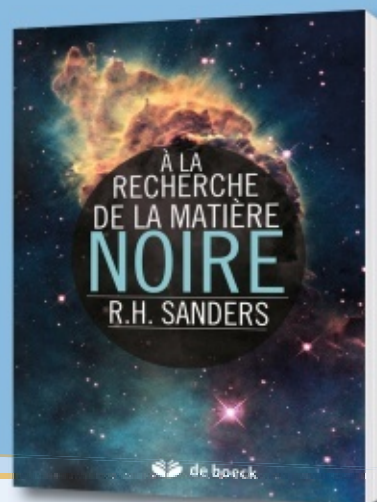
ÉPIDÉMIE D'OBÉSITÉ
L'impact de l'environnement

M 02687 - 421 - F: 6,20 €





NOUVEAUTÉS sciences



PSYCHIATRIE ET NEUROSCIENCES

Pierre **SCHULZ**

Cet ouvrage présente une synthèse des connaissances contemporaines sur les traitements biologiques en psychiatrie. Il offre une sélection d'informations en neurosciences cliniques et des recommandations pour la pratique médicale.

54,00 € ~ 576 pages

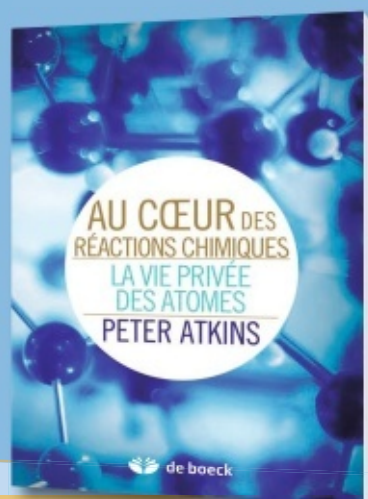
À LA RECHERCHE DE LA MATIÈRE NOIRE

Robert **SANDERS**

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

22,00 € ~ 230 pages

Des découvertes passionnantes!



AU CŒUR DES RÉACTIONS CHIMIQUES

Peter William **ATKINS**

L'originalité de ce livre tient au fait que le lecteur se retrouve parmi les atomes, avec pour seule mission de comprendre comment ils se comportent vis-à-vis de leurs voisins.

25,00 € ~ 198 pages



À LA DÉCOUVERTE DE LA CHIMIE

Paul **DEPOVERE** - Aurélie **KOOT**

Apprenez la chimie très agréablement grâce à cette BD qui explique comment sont nées certaines expériences et découvertes chimiques.

18,00 € ~ 48 pages



POUR LA SCIENCE

www.pourlascience.fr

8 rue Férou, 75278 PARIS CEDEX 06
Standard : Tel. 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 Baillly

Dossiers Pour la Science

Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin

Cerveau & Psycho

Rédactrice en chef : Françoise Pétry

Rédacteur : Sébastien Bohler

L'Essentiel Cerveau & Psycho

Rédactrice : Bénédicte Salthun-Lassalle

Directrice artistique : Céline Lapert

Secrétariat de rédaction/Maquette : Annie Tacquenot, Sylvie Sobelman, Pauline Bilbault, Raphaël Quérue, Ingrid Leroy

Site Internet : Philippe Ribeau-Gésippe assisté de Yoan Bassinet

Marketing : Élise Abib

Direction financière : Anne Gusdorf

Direction du personnel : Marc Laumet

Fabrication : Jérôme Jalabert assisté de Marianne Sigogne

Presse et communication : Susan Mackie

Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé

Conseillers scientifiques : Philippe Boulanger et Hervé This

Ont également participé à ce numéro : Gregory Barsh, Maximilian Bauer, Bernard Bégaud, Serge Berthier, Michel Brune, Nicole Capitaine, Patrick De Kepper, Hélène Morlon, Florence Noble, Christophe Pichon, Éric Reyssat, Daniel Rouan, Daniel Tacquenot, Elisabeth Vangioni.

PUBLICITÉ France

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin

(jf.guillotin@pourlascience.fr)

Tél. : 01 55 42 84 28 ou 01 55 42 84 97 • Fax : 01 43 25 18 29

SERVICE ABONNEMENTS

Ginette Bouffaré. Tél. : 01 55 42 84 04

Espace abonnements :

http://tinyurl.com/abonnements-pourlascience

Adresse e-mail : abonnements@pourlascience.fr

Adresse postale :

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

Commande de livres ou de magazines :

0805 655 255 (numéro vert)

DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE

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.

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

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents 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).



ÉDITO

de Françoise Pétry directrice de la rédaction

Esprit droit ou juste ?

La rhétorique est l'art de la persuasion par le langage. Elle fut pratiquée par les sophistes, et notamment par Protagoras d'Abdère (–485 à –410 environ). Il considérait que toute cause est défendable et que l'homme est la mesure de toutes choses. Dès lors, aucune connaissance, aucune valeur ne serait universelle. Ce relativisme, qui semble interdire la possibilité d'un savoir objectif, fut condamné par Platon (–423 à –348).

Aujourd'hui, le relativisme séduit certains esprits, pour qui tous les savoirs et toutes les opinions se vaudraient. Dans ce contexte, les frontières entre science, opinions, croyances, voire mysticisme, se brouillent. Certains scientifiques, notamment aux États-Unis, participent à ce courant, profitant de leur image de chercheur reconnu par leurs pairs et de personnage médiatique pour instiller dans leurs ouvrages leurs croyances personnelles (voir l'entretien avec Yves Gingras, page 22).

Les frontières se brouillent.

La déception peut faire le lit du relativisme. Or le doute s'installe parfois chez certains, déçus que la science n'ait pas répondu à tous les espoirs qu'elle avait soulevés au XX^e siècle. Mais la science progresse, tâtonne, s'aventure dans des voies sans issue, se trompe parfois et remet sans cesse l'ouvrage sur le métier. Même en mathématiques (ou surtout en mathématiques ?), la prudence est de mise. Un mathématicien japonais a annoncé avoir résolu un problème de la théorie des nombres, la conjecture ABC. L'annonce de sa résolution a été prise avec circonspection : étant donné la longueur de la démonstration, elle n'a pas encore été vérifiée (voir La conjecture ABC, page 24). Pourtant, la résolution de cette conjecture soulagerait la communauté des mathématiciens. Si l'on n'avait pas mis en évidence le boson de Higgs, les physiciens auraient dû revoir le modèle fondamental de la physique. Si la conjecture ABC était fautive, la géométrie algébrique tremblerait sur son socle...

Selon le philosophe Alain (1868-1951) : « Un homme savant a compris un certain nombre de vérités. Un homme cultivé a compris un certain nombre d'erreurs. Et voilà toute la différence entre l'esprit droit et l'esprit juste. L'esprit droit surmonte l'erreur sans la voir ; l'esprit juste voit l'erreur. » [Les vigiles de l'esprit, 1942]. Le scientifique doit voir l'erreur... et la surmonter. Est-il droit et juste ?

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

6

**OGM : une étude
qui en appelle d'autres**

8

**Démence : les somnifères,
facteurs de risque ?**

9

**Éclaircie dans l'énigme
du lithium cosmique**

12

**Le rat qui peut changer
de peau****... et bien d'autres sujets.**

13

LES PRIX NOBEL 2012**Opinions**

14

POINT DE VUE**Attention à la notion
de culture en politique !***Régis Meyran*

15

DÉVELOPPEMENT DURABLE**Peut-on recycler à l'infini ?***Alain Geldron*

18

VRAI OU FAUX**Les estrogènes
protègent-ils des maladies
cardio-vasculaires ?***Pierre-Yves Scarabin*

20

COURRIER DES LECTEURS

22

ENTRETIEN**Croyances :
des scientifiques
à contre-emploi***Entretien avec Yves Gingras*

Le numéro comporte deux encarts d'abonnement
Pour la Science brochés sur la totalité du tirage ainsi que deux
 encarts posés en 4° de couverture : un courrier *Pour la Science*
 offre spéciale Noël sur l'ensemble de la diffusion abonné
 et 11 500 exemplaires d'un encart *Philosophie magazine*
 en aléatoire sur l'édition France métropolitaine.
 En couverture : © Jean-François Colonna
 [CMAP/École polytechnique, www.lactamme.polytechnique.fr]

À LA UNE**24****MATHÉMATIQUES****La conjecture ABC***Gerhard Frey*

Les décompositions en facteurs
 premiers de deux entiers A et B
 sont reliées à celle de leur somme C
 par des lois profondes
 qui s'éclaircissent peu à peu.

32**TECHNOLOGIE****Les LED blanches,
l'éclairage de demain***Nicolas Grandjean*

Les lampes à diodes électroluminescentes
 blanches sont appelées à remplacer les ampoules
 à incandescence. Elles offrent une bonne qualité
 de lumière et autorisent d'importantes
 économies d'énergie.

40**ASTROPHYSIQUE****Le climat des exoplanètes***Kevin Heng*

L'étude de l'atmosphère des planètes extrasolaires
 est désormais à la portée des astronomes.
 On parvient aujourd'hui à estimer la température
 et la vitesse des vents à la surface
 de certaines exoplanètes.



68 NEUROBIOLOGIE**Plaisir : la nouvelle carte cérébrale***Morten Kringelbach et Kent Berridge*

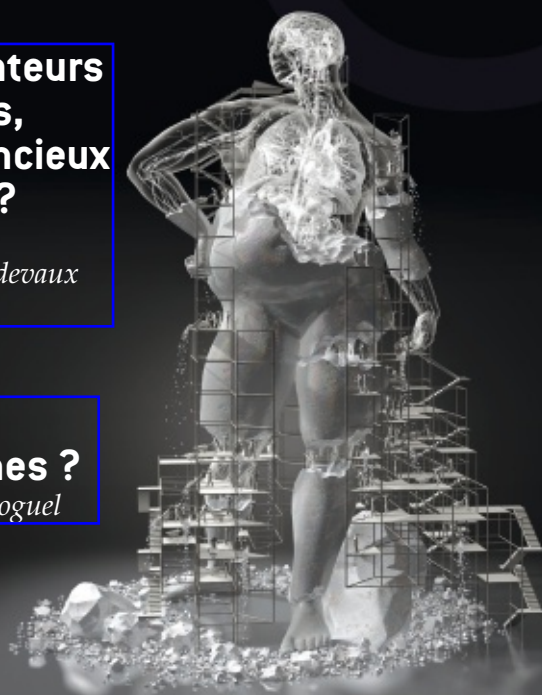
Les circuits cérébraux associés au plaisir ont été précisés. De meilleurs traitements de la dépendance et de certaines maladies mentales pourraient en découler.

DOSSIER

L'épidémie d'**obésité**, entre gènes et environnement

54 ÉPIDÉMIOLOGIE**Éradiquer l'obésité ?***D. Meyre et Ph. Froguel***56 ENDOCRINOLOGIE****Les perturbateurs
endocriniens,
acteurs silencieux
de l'obésité ?**

*J.-B. Fini,
M.-S. Clerget-Froidevaux
et B. Demeneix*

64 GÉNÉTIQUE**L'obésité
dans les gènes ?***D. Meyre et Ph. Froguel***Regards****76****HISTOIRE DES SCIENCES****Comment on a déclaré
la guerre au DDT***Valérie Chansigaud*

En 1962, l'Américaine Rachel Carson dénonçait l'impact des pesticides sur l'environnement et la santé.

80**LOGIQUE & CALCUL****Les entiers ne naissent
pas égaux***Jean-Paul Delahaye*

Il est impossible de définir une loi de probabilité uniforme sur l'ensemble des nombres entiers.

86**SCIENCE & FICTION****La Force des Jedis***J.-S. Steyer et R. Lehoucq***88****ART & SCIENCE****Piero della Francesca
et les « piles d'assiettes »***Loïc Mangin***90****IDÉES DE PHYSIQUE****Propulsions préhistoriques***Jean-Michel Courty
et Édouard Kierlik***93****SCIENCE & GASTRONOMIE****Des goûts et des récepteurs***Hervé This***94****À LIRE****Rendez-vous sur****POUR LA
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.
** En créant votre compte.

→ MOI ET LES MATHS

Pour un mathématicien ordinaire, le fait que des pans entiers de sa discipline lui échappent est un rappel humiliant de ses limitations. Est-il même en droit d'avoir une opinion sur les mathématiques, lui qui en connaît une si faible proportion ? Deux lectures le soulageront peut-être : il est en bonne compagnie. Dans *Les Déchiffreurs* (Belin, 2008), Maxim Kontsevitch (médaillé Fields 1998) déclare : « Il est courant pour un mathématicien de manifester un certain dédain envers un collègue travaillant dans un domaine différent du sien. Quel plaisir pervers ce type peut-il trouver à étudier un sujet sans objet et parfaitement rébarbatif ? J'ai certes essayé d'apprécier la beauté cachée de différents domaines, mais il reste bien des champs où la source de l'intérêt demeure pour moi un mystère complet. »

Dans *Théorème vivant* (Grasset, 2012), Cédric Villani (médaillé Fields 2010) écrit que Ngô Bao Châu (également médaillé Fields 2010) a résolu un vieux problème relevant « d'un domaine réputé pour sa difficulté, qui m'est totalement étranger ». Il écrit aussi : « Je ne comprends pas un traître mot à la recherche de Vladimir Voevodsky [médaillé Fields 2002], et la réciproque est probablement vraie. » Ainsi, semblent révolues non seulement l'époque où les mathématiciens avaient une vue d'ensemble de leur discipline, mais aussi celle où ils regrettaient de ne plus pouvoir en avoir une.

Dans les dîners en ville, les mathématiciens s'agacent d'entendre leur voisin (avocat ou médecin, inévitablement) dire : « Les maths, moi, je vous avoue, je n'y ai jamais rien compris. » Peut-être, dans les dîners entre médaillés Fields, chacun agace-t-il son voisin en lui susurrant : « Tes maths, moi, tu sais, je n'en ai pas lu une ligne. »

L'ignorance des mathématiques est la chose du monde la mieux partagée.

→ ÉLUCUBRATIONS

De Rabelais à Borges, les écrivains recourent à l'énumération pour faire naître le comique, le vertige métaphysique, le souffle épique.

Mais, maniée par les universitaires, l'énumération perd sa saveur. Un sociologue écrit ainsi : « Les pratiques économiques comme les pratiques pédagogiques, les pratiques religieuses comme les pratiques scientifiques, les interactions ordinaires comme les actes d'institution les plus marquants, s'organisent et s'effectuent toujours à travers de multiples pratiques langagières (contrats, écritures comptables, exercices scolaires et leçons, catéchismes ou textes sacrés, théories, formules mathématiques ou comptes rendus d'expérience, conversations informelles ou discours d'institution, etc.). » Le lecteur, groggy, en vient à ne plus percevoir la banalité de la synthèse : « Les pratiques langagières sont d'emblée présentes dans toute activité humaine » (Bernard Lahire, *Les cadres sociaux de la cognition*, dans F. Clément et L. Kaufmann, *La sociologie cognitive*, Éditions de la Maison des sciences de l'homme, 2011).

Donner des exemples est une démarche inverse à celle qui consiste à énumérer. On exprime une idée, puis on la fait jouer sur des exemples pour la rendre plus claire, montrer sa portée et ses limites, etc. Au contraire, énumérer sert souvent

à cacher soit qu'il n'y a pas d'idée, soit que celle-ci est banale. Dans l'écriture d'un « texte d'idée », une énumération ne devrait pas dépasser l'étape du brouillon. Si elle fait naître une idée originale, c'est celle-ci qu'il est intéressant de dégager et de publier. Si elle n'en fait pas naître, mieux vaut attendre des jours meilleurs.



→ QUESTION DE POINT DE VUE

En visitant une église, en Arménie, le physicien russe Sergey Kapitza (1928-2012) remarque une relique : un morceau de bois provenant de l'arche de Noé. Il demande au prêtre qui le guide s'il peut en obtenir un fragment, afin de faire une datation au carbone 14. « Volontiers, répond le prêtre, ce serait un excellent test pour votre méthode » (Sergey Kapitza, *Global Population Blow-Up and After, Global Marshall Plan Initiative*, 2006).

Kapitza ne précise pas si la datation a eu lieu, mais l'anecdote donne à méditer. Le prêtre prend d'emblée comme référence son système de pensée. Il n'est pas fermé à la science mais, à ses yeux, il revient à la tradition religieuse de tester ce qu'elle dit. Alors qu'aux yeux d'un physicien, il revient à la science de tester ce que dit la tradition.

Chacun de nous construit une dissymétrie plus ou moins inconsciente. Ses



convictions lui paraissent dotées de la force de l'évidence, pas celles de son interlocuteur. Un dialogue n'est possible que si chacun admet que ses évidences n'en sont que pour lui. Il faut introduire une symétrie, c'est-à-dire trouver un terrain dans lequel aucun des systèmes de pensée en présence n'est privilégié. Apparemment, il ne suffit pas d'être dans une église pour que ce petit miracle se réalise.

→ CENTRE RELATIF

Vous êtes égaré dans cet enchevêtrement de villes qu'est une banlieue – celle de Bordeaux, disons. À force, vous ne savez plus si vous êtes en train d'errer à Talence, à Bègles, à Villenave d'Ornon, à Gradignan, à Pessac... Les poteaux indicateurs ne sont d'aucun secours. Quand ils ne donnent pas la direction de quelque obscur lieudit, ils donnent celle du « Centre ville », sans autre précision. « Centre ville, je veux bien, mais de quelle ville ? » La moindre commune, dirait-on, se prend pour une célébrité : chacun est censé la reconnaître, elle croirait déchoir d'avoir à rappeler son nom.

Rien de tel que d'être ballotté de panneau « Centre ville » en panneau « Centre ville », dans la déprimante uniformité d'un tissu urbain, pour percevoir à quel point la notion de centre est relative, locale – et, pour tout dire, insignifiante.



Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques

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



La tour Eiffel
Une ethnologie d'un espace touristique
Gilles Teissonnières

368 pages
16 x 24 cm
ill. n. et b.
28,40 €



Histoire de l'anthropologie de la parenté
Autour de Paul Lacombe (1834-1919)
sous la direction de
Agnès Fine et Nicolas Adell

408 pages
17 x 22 cm
28,40 €



Le Feu aux poudres
Une ethnologie de la « modernisation » du service public
Ghislaine Gallenga

304 pages
16 x 24 cm
ill. n. et b.
28,40 €

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

Biologie végétale

OGM : une étude qui en appelle d'autres

Une étude sur un maïs génétiquement modifié relance le débat sur la toxicité des OGM. Au-delà des controverses qu'elle réveille, elle oblige à repenser les modalités d'autorisation de commercialisation et les procédures de tests.

Le 19 septembre, la revue *Food and Chemical Toxicology* publiait une étude de Gilles-Éric Séralini, de l'Université de Caen et du Comité de recherche et d'information indépendantes sur le génie génétique (le CRIIGEN), consacrée aux effets de la consommation d'un herbicide et d'un maïs génétiquement modifié résistant à ce produit. La publication a fait grand bruit, beaucoup de réactions ont été enflammées... et tous en ont appelé à la raison ! Soit, examinons sans passion les différents aspects de ce nouveau rebondissement dans la controverse sur les OGM.

D'abord, en quoi a consisté l'étude ? Elle s'intéressait au maïs NK603, commercialisé par la firme *Monsanto*, génétiquement modifié pour résister au *Roundup*, l'un des herbicides les plus utilisés dans le monde. Quelque 200 rats de la souche Sprague-Dawley ont été répartis en plusieurs groupes : un groupe contrôle ; trois groupes nourris avec diverses concentrations de maïs NK603 non traité au *Roundup* ; trois groupes similaires aux précédents, mais dont le maïs avait été traité avec l'herbicide ; trois groupes au régime alimentaire sans OGM, mais dont l'eau contenait du *Roundup* à des concentrations variables.

Au total, 20 groupes (10 pour chaque sexe) de dix animaux ont été testés. Pendant deux ans, le sang des rats a été prélevé toutes les trois semaines environ afin qu'y soient mesurés 31 paramètres. Au terme de l'expérience, tous les organes des animaux ont été examinés selon divers procédés.

Les mâles et les femelles du groupe contrôle ont vécu en moyenne 624 et 701 jours, ces durées de vie ayant servi de base pour tester la mortalité : tout



Le maïs NK603, génétiquement modifié pour résister au *Roundup*, est-il sans effets sur la santé ? Une étude sur des rats montre que non. Elle est critiquée, mais relance le débat sur les procédures de tests des OGM.

décès ultérieur était attribué à l'âge. Dans le groupe contrôle, 30 pour cent des mâles et 20 pour cent des femelles sont morts avant cet âge. Ces chiffres atteignent 50 et 70 pour cent chez les rats nourris avec l'OGM, mais la mortalité n'était pas proportionnelle à la dose. Les auteurs supposent un effet de seuil : la surmortalité apparaîtrait dès une certaine quantité, faible, d'OGM ingérée.

Chez les femelles, la plupart des morts étaient dues à des tumeurs des glandes mammaires ou de l'hypophyse. Chez les mâles, les organes les plus touchés étaient le foie et les reins. Les tumeurs étaient deux à trois fois plus fréquentes chez les rats testés que dans le groupe contrôle. Le nombre et la taille des tumeurs n'étaient pas proportionnels à la dose ingérée, ce qui trahirait, là encore, un effet de seuil.

Les auteurs concluent que le glyphosate, le principe actif du *Roundup*, est toxique à des teneurs bien inférieures à celles acceptées par les autorités sanitaires. De plus, la consommation de l'OGM NK603 seul aurait les mêmes effets délétères sur le foie, les reins, les glandes mammaires...

Le mécanisme proposé est fondé sur le rôle de l'enzyme EPSP synthase. Chez les plantes, elle participe à la synthèse de l'acide shikimique, un précurseur clef de nombreux composés essentiels. Le glyphosate est un inhibiteur de cette enzyme, ce qui est fatal à la plante. Or, chez le maïs NK603, un gène d'une version bactérienne de l'EPSP synthase (insensible au glyphosate) est introduit dans le génome de la plante. Celle-ci produirait moins de composés phénoliques dérivés de l'acide shikimique, connus pour

leur action antioxydante. Ainsi, les rats nourris d'OGM bénéficieraient d'une moindre protection et seraient plus enclins à développer des tumeurs. Ce mode d'action doit être confirmé.

L'équipe de G.-E. Séralini compare son protocole à, d'une part, celui retenu par *Monsanto* dans un article de 2004 pour évaluer un maïs résistant au glyphosate et, d'autre part, celui recommandé par l'OCDE pour tester la toxicité de divers produits. Les auteurs mettent en avant la durée de leur étude (24 mois contre 3 le plus souvent), le nombre de doses testées (trois contre deux), le nombre de paramètres mesurés notablement supérieur...

La méthodologie semble exemplaire et *Food and Chemical Toxicology* est une revue qui publie après vérification par les pairs sans parti pris. Pourtant, plusieurs objections à l'étude ont été soulevées. D'abord, l'usage de la souche Sprague-Dawley de rats a été critiquée, car elle est connue pour sa propension à développer diverses tumeurs et son espérance est d'environ deux ans. En 1979, une étude a montré que parmi 100 rats ayant vécu plus de deux ans, 81 avaient développé une tumeur. Précisons que l'organe le plus touché était la thyroïde et non les glandes mammaires, le foie ou les reins. En outre, cette souche est celle utilisée pour des tests de cette nature, notamment ceux de *Monsanto* en 2004. Fallait-il prendre une souche plus robuste et rendre la comparaison moins pertinente ou bien la même souche et rendre délicate l'interprétation des résultats ?

Autre problème, le nombre de rats par groupe. À raison de dix par groupe (en tenant compte du sexe), les résultats sont-ils statistiquement fiables ? Certains en doutent et ce d'autant plus que la souche choisie a un faible taux de survie. Une population totale de 200 animaux est souvent ce qui a été choisi dans d'autres études, mais ici le nombre de doses et de combinaisons testées diminue la taille des groupes et affaiblit la portée des résultats. Remarquons

En bref

DU SEL POUR LE PARASITE

L'aquaculture des crabes bleus est confrontée à un taux de mortalité qui peut s'élever jusqu'à 50 pour cent à cause du parasite unicellulaire *Hematodinium*. Jeff Shields, de l'Institut de science marine de Virginie, aux États-Unis, a étudié le cycle de vie du parasite et a découvert que ses spores ne survivent que dans l'eau très salée. Cette observation permettra de contrer la dispersion de *Hematodinium* en utilisant, par exemple, des bassins d'isolement remplis d'eau peu salée.

VERS DES LACS PLUS VERTS

Lars-Anders Hansson et ses collègues, à l'Université de Lund, ont étudié les conséquences d'une élévation de la température sur l'équilibre de la chaîne alimentaire dans les lacs. Là où les poissons sont absents, le zooplancton consomme les algues et régule leur prolifération. Mais dans les lacs où vivent des poissons, une hausse de la température favorisera la croissance de ces derniers. Et comme certains poissons se nourrissent de zooplancton, ces lacs verront un fort développement d'algues.

DE LA VIANDE AU MENU

Nos ancêtres mangeaient régulièrement de la viande il y a 1,5 million d'années. C'est ce qu'indique un fragment de crâne découvert dans les gorges d'Olduvai, en Tanzanie, par une équipe internationale dirigée par Manuel Dominguez-Rodrigo et Travis Pickering. Cet os appartiendrait à un enfant hominidé âgé de deux ans et présentant des traces d'ostéoporose liée à une anémie. La viande serait ainsi devenue indispensable dans la nutrition à cette époque et son absence aurait provoqué la maladie chez l'enfant.

toutefois que l'étude de 2004 aussi bien que les préconisations de l'OCDE sont également fondées sur des groupes de dix rats. Des groupes plus importants seraient certes nécessaires... mais dans tous les cas !

La troisième critique concernait le plan média (documentaire, film, livre...) qui a accompagné la publication de l'étude. En outre, les journalistes qui pouvaient avoir accès à cet article avant la levée de l'embargo étaient tenus à une clause de confidentialité qui leur interdisait de solliciter des avis extérieurs. Une façon de faire peu orthodoxe qui a rendu soupçonneuses la communauté scientifique et celle des journalistes.

Autre sujet de tension, les possibles conflits d'intérêts. L'étude est financée par le CRIIGEN (plusieurs auteurs de l'article en sont membres), organisme qui ne cache pas ses réticences contre les OGM, la Fondation Charles-Léopold Mayer, l'Association CERES qui rassemble certaines enseignes de la grande distribution et enfin le ministère français de la Recherche.

En 2011, l'un des éditeurs de *Food and Chemical Toxicology*,

le toxicologue José Domingo, constatait que la plupart des études sur la toxicité des plantes génétiquement modifiées étaient conduites à la demande des sociétés qui commercialisent ces plantes. Il déplorait le manque d'études indépendantes. Celle de G.-E. Seralini comble-t-elle ce déficit ? Difficile de se prononcer. Peut-être doit-on attendre la mise à disposition des données brutes, promise par les auteurs. Cepen-

RIGUEUR, TRANSPARENCE

et indépendance : quand les procédures d'évaluation des risques liés aux OGM respecteront-elles ces critères ?

dant, ils réclament la même transparence de la part de l'Autorité européenne de sécurité des aliments (l'EFSA) qui a rendu un avis favorable pour cet OGM en 2009 (avis que la Commission européenne n'a pas encore validé) et qui vient de critiquer l'étude de G.-E. Seralini.

Le gouvernement français a rappelé l'initiative qu'il a prise en juillet de réclamer à l'EFSA une révision des procédures d'évaluation des OGM. De fait, le pro-

toque en vigueur a été établi pour des substances chimiques et est fondé sur le dogme de la proportionnalité, selon lequel c'est la dose qui fait le poison. Or ce dogme a déjà été mis à mal par plusieurs études portant sur les perturbateurs endocriniens, notamment le bisphénol. Les modifications souhaitées porteraient sur la durée des tests, sur l'accès public aux données et sur l'indépendance des agences d'évaluation. Le ministre de l'Agriculture a également demandé à l'Agence nationale de sécurité sanitaire d'expertiser les travaux de l'équipe de G.-E. Seralini.

C'est peut-être ce qu'il faut retenir de cette étude qui montre, au plus, que la consommation d'un OGM (le maïs NK603), parmi de nombreux autres, n'est pas sans danger. La nécessité de nouvelles procédures pour évaluer les risques des OGM avec rigueur, en toute transparence et de façon indépendante des divers intérêts en jeu, est criante.

→ **Loïc Mangin**

G.-E. Seralini et al., *Food and Chemical Toxicology*, en ligne, 19 septembre 2012

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

Biophysique

Une baie plus bleue que bleue



Shiva Vignolini et al., PNAS, 2012

Les fruits de *Pollia condensata* sont des baies d'un intense bleu métallique, qui persiste plusieurs dizaines d'années après leur cueillette.

Les baies de *Pollia condensata*, une herbacée d'Afrique centrale, sont d'un puissant bleu métallique constellé de minuscules irrégularités vertes et rouges. Leur couleur est due non pas à des pigments, mais à un mécanisme optique similaire à celui à l'œuvre dans les élytres des scarabées, quoique plus perfectionné encore ; c'est ce qu'a montré une équipe de l'Université de Cambridge par microscopie électronique. Comme chez les scarabées, la lumière interfère avec des structures hélicoïdales – ici les fibres de cellulose empilées formant la paroi des cellules qui enveloppent la baie. Périodique, l'empilement ne réfléchit qu'une longueur d'onde – principalement du bleu, mais aussi du rouge ou du vert, selon la cellule. Là réside la nouveauté : chaque cellule réfléchit une couleur qui lui est propre, ce qui donne au fruit son aspect moucheté. La lumière réfléchie est en outre polarisée circulairement, vers la droite ou vers la gauche selon les cellules. Ces fruits sans intérêt nutritif tromperaient les oiseaux qui, attirés par leurs couleurs chatoyantes, les cueilleraient et participeraient ainsi à leur dispersion.

→ **Marie-Neige Cordonnier**

S. Vignolini et al., PNAS, en ligne le 10 septembre 2012

Neurosciences

Démence : les somnifères, facteurs de risque ?

Le 25 septembre dernier, en France, la Haute autorité de santé a lancé une campagne d'information visant à une utilisation raisonnée, chez les personnes âgées, des benzodiazépines, classe de molécules prescrites contre l'anxiété et les troubles du sommeil. Une nouvelle étude renforce ce message en montrant que parmi les plus de 65 ans, le risque de développer une démence – des troubles cognitifs persistants – est supérieur d'environ 50 pour cent chez ceux qui consomment ces molécules.

En France, près d'un tiers des plus de 65 ans et près de 40 pour cent des plus de 85 ans consomment des benzodiazépines de façon régulière. Pourtant, depuis une dizaine d'années, certains scientifiques se demandent si un usage chronique des benzodiazépines ne favorise pas la démence : plusieurs études ont mis en évidence un risque accru de démence chez les consommateurs de benzodiazépines,

tandis que d'autres n'observaient pas d'effet significatif, voire notaient un effet protecteur. La présente étude est la première réalisée sur une période supérieure à huit années.

Des épidémiologistes de trois unités de l'INSERM à Bordeaux ont analysé un échantillon de 1063 personnes de plus de 65 ans sans symptômes de démence au début du suivi. Parmi eux, 968 n'ont jamais pris de benzodiazépines, et les 95 autres ont commencé à en prendre entre trois et cinq ans après le début de l'étude. En 15 ans, 253 cas de démence ont été diagnostiqués, dont 32 pour cent des consommateurs de benzodiazépines, contre 23 pour cent de ceux qui n'en prenaient pas. En outre, la démence se déclarait plus tôt chez les consommateurs.

Même après la prise en compte des facteurs potentiels de démence tels que l'âge, le sexe, le niveau d'études ou des symptômes de dépression, les scientifiques ont observé un risque



accru de démence chez les consommateurs de benzodiazépines. Si cette étude ne prouve pas qu'il existe un lien de cause à effet entre le traitement et la survenue de démence, elle incite à la prudence. Dans le doute, il est recommandé de limiter les traitements à quelques semaines.

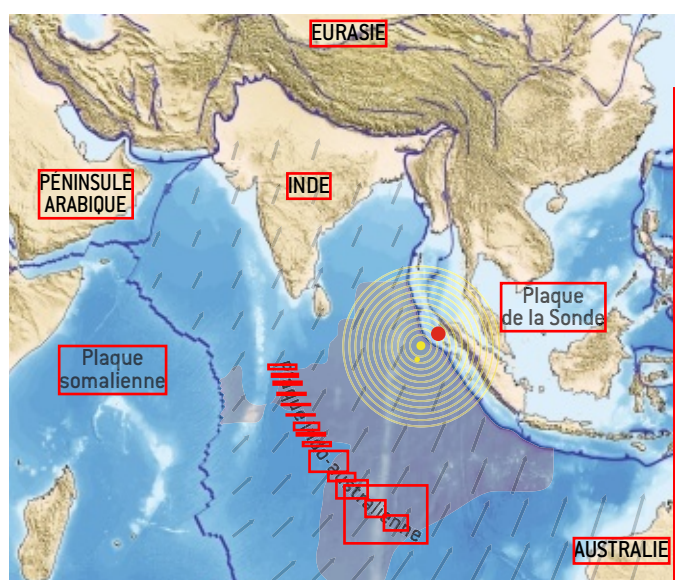
→ M.-N. C.

S. Billoti de Gage et al., BMJ, vol. 345, e6231, 2012

149 597 870 700 MÈTRES : c'est la valeur exacte de l'« unité astronomique », unité de distance qui vient d'être redéfinie par l'Union astronomique internationale.

Géophysique

L'Inde et l'Australie vont se séparer



Le mégaséisme de 2004 (point rouge) a déclenché les deux grands séismes intraplaques de 2012 (points jaunes) et de nombreux autres séismes qui traduisent tous une déformation à long terme de la plaque indo-australienne.

Avec des collègues, Matthias Delescluse, du Laboratoire de géologie de l'École normale supérieure, à Paris, vient de montrer que deux séismes atypiques qui ont eu lieu en avril 2012 au large de Sumatra traduisent un début de déchirement de la plaque indo-australienne.

Cette plaque plonge sous la plaque de la Sonde au fond d'une fosse de subduction qui longe l'île de Sumatra. En décembre 2004, toute la région a été secouée par un mégaséisme (de magnitude 9,3) dû au brusque relâchement des tensions accumulées au cours de cette subduction.

Les deux séismes atypiques de 2012 se sont produits à l'intérieur de la plaque indo-australienne et en retrait de l'épicentre du mégaséisme de 2004. De tels « séismes intraplaques » sont fré-

quents dans la région... mais pas avec des magnitudes de 8,2 et de 8,6 ! Ces séismes exceptionnels font par ailleurs partie d'un groupe d'une trentaine de séismes du même type enregistrés dans la région depuis 2004.

Le moteur de cette sismicité intraplaque est la subduction, qui, depuis huit à dix millions d'années, déforme la plaque indo-australienne, le mouvement de l'Inde étant ralenti par l'Asie. Ainsi, tandis que la « plaque indienne » se déplace vers le Nord-Est et par rapport à la Sonde de seulement 37 millimètres par an, la « plaque australienne » plonge sous la Sonde à la vitesse de 56 millimètres par an. L'Australie tend donc à s'arracher à l'Inde, qui la freine.

→ François Savatier

Nature, en ligne le 26 septembre 2012

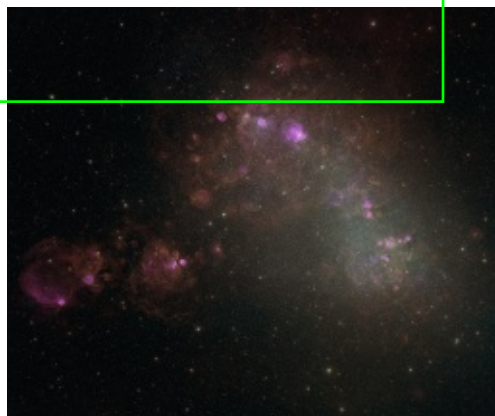
Cosmologie

Éclaircie dans l'énigme du lithium cosmique

Le lithium a été produit alors que l'Univers n'était âgé que de deux minutes. La théorie de la nucléosynthèse primordiale permet de calculer l'abondance des éléments créés. Les prévisions du modèle sont compatibles avec les observations pour l'hydrogène, le deutérium et l'hélium, mais elles diffèrent pour le lithium. Toutefois, Christopher Howk, du Centre d'astrophysique de l'Université Notre-Dame, dans l'Indiana, et ses collègues ont mesuré, dans le milieu interstellaire du Petit Nuage de Magellan, une abondance de lithium compatible avec la valeur prévue par la théorie de la nucléosynthèse primordiale.

Les astrophysiciens mesurent d'habitude les abondances dans l'atmosphère de vieilles étoiles où l'on suppose que la composition chimique n'a pas beaucoup évolué et est restée proche de celle de l'Univers primordial. Or pour le lithium 7, l'abondance ainsi observée était trois fois plus faible que celle prévue par la théorie. Mais ces mesures sont tributaires de notre compréhension de la physique des étoiles : réactions nucléaires, mouvements de matière dans l'astre, mélange entre les couches externes et les couches profondes, etc.

La nouvelle mesure de C. Howk et ses collègues permet-elle pour autant de conclure que le problème cosmologique du lithium est résolu ? Selon Elisabeth Vangioni, de l'Institut d'astrophysique de Paris, le milieu interstellaire est loin d'être similaire au milieu



Le milieu interstellaire du Petit Nuage de Magellan (ci-dessus) contient du lithium dans des proportions compatibles avec la théorie de la nucléosynthèse primordiale.

primordial. De plus, cette mesure repose sur des modèles d'ionisation du gaz qui peuvent conduire à des incertitudes importantes. Il s'agit cependant d'une estimation intéressante de l'abondance du lithium dans le milieu interstellaire extragalactique. Ces observations permettront, à terme, de mieux comprendre l'évolution du lithium dans l'Univers.

→ Sean Bailly

J. C. Howk et al., *Nature*, vol. 489, pp. 121-123, 2012

En bref

COUP DE PATTE VÉGÉTAL

Drosera glanduligera, une plante carnivore australienne, ne se contente pas d'embuscades passives. Simon Poppinga et ses collègues, en Allemagne, ont montré que lorsqu'un insecte marche sur l'un de ses longs tentacules dotés de cellules sensibles, la plante le replie en quelques fractions de seconde, catapultant sa proie vers des tentacules adjacents et gluants (qui déplacent ensuite lentement la proie vers le creux de la feuille). C'est l'un des mouvements les plus rapides du monde végétal. Plusieurs mécanismes ont été proposés, fondés sur des forces hydrauliques au sein du tentacule.

LA GÉNÉTIQUE DES RAYURES

Comment se forment les rayures et les taches sur le pelage des chats ? Sur la base d'études génétiques, une équipe internationale a proposé un mécanisme en deux temps. Lors du stade fœtal, un gène noté *Taqpep* contrôlerait la formation d'un « pré-motif moléculaire » – les concentrations en certaines molécules à travers la peau dessinant une répartition spatiale particulière. Ces molécules modèleraient l'expression d'un second gène, *Edn3*, qui influe sur la couleur du pelage.

Microbiologie

Coopération guerrière chez les bactéries

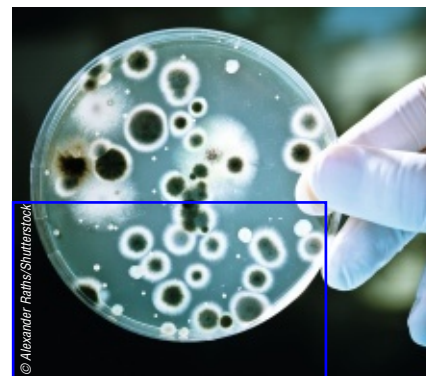
De nombreuses bactéries produisent des antibiotiques, toxiques pour leurs congénères. Ces armes chimiques déciment-elles aveuglément toutes les autres bactéries, dans une guerre de chacun contre tous ? Selon Otto Cordero, de l'Institut de technologie du Massachusetts (MIT), et ses collègues, ce n'est pas le cas : certaines bactéries marines forment des micropopulations où quelques individus fabriquent des « armes collectives », c'est-à-dire des substances toxiques uniquement pour les bactéries des autres populations.

O. Cordero et ses collègues ont cultivé des bactéries marines de la famille des Vibrionacées, qui se sont réparties en micropopulations géographiquement distinctes, puis ont étudié leurs interactions. Ils ont constaté qu'une petite fraction des bactéries (moins de cinq pour cent) produit des antibiotiques particulièrement efficaces, qui inhibent la croissance du quart des individus présents dans le milieu de culture. Les biologistes ont aussi montré que les bactéries appartenant à la même population qu'une de ces productrices, c'est-à-dire ses voisines proches, résistent à ces substances. Est-ce parce qu'elles sont

toutes issues d'un individu unique, qui leur aurait transmis un gène de résistance ? Non, car bien qu'elles soient génétiquement plus proches entre elles qu'avec les bactéries des autres populations, elles ne sont pas identiques : elles n'ont que 72 pour cent de gènes communs en moyenne, bien moins que si elles étaient toutes issues du même individu. C'est donc leur proximité géographique, et non une filiation commune, qui aurait favorisé la transmission des gènes de résistance, lors d'échanges dits horizontaux.

→ Guillaume Jacquemont

O. Cordero et al., *Science*, en ligne, 7 sept. 2012



Des colonies de bactéries cultivées dans une boîte de Pétri.

Médecine

Un antibiotique naturel contre la tuberculose

La tuberculose tue aujourd'hui près de deux millions de personnes dans le monde chaque année. De nombreux médicaments existent, mais des souches résistantes de la bactérie sont apparues ces dernières années, pour lesquelles les traitements sont inopérants.

Afin de trouver une parade, les chercheurs étudient des bactéries, qui produisent des substances susceptibles de neutraliser ou tuer des organismes concurrents. L'équipe de Stewart Cole, à l'École polytechnique fédérale de Lausanne, vient de montrer que la pyridomycine, produite par la bactérie *Dactyloporangium*

fulvum, est active même contre certaines formes résistantes de la tuberculose.

En étudiant diverses souches mutées de *Mycobacterium tuberculosis*, le bacille à l'origine de la maladie, S. Cole et ses collègues ont mis en évidence l'enzyme sur laquelle agit la pyridomycine. Ce composé modifie la conformation de l'enzyme InhA nécessaire pour la synthèse d'acides mycoliques, des cires présentes dans la paroi de *M. tuberculosis*. En l'occurrence, InhA était déjà la cible du traitement à base d'isoniazide, une autre molécule utilisée contre la tuberculose. Mais l'isoniazide nécessite d'être acti-

vée par *M. tuberculosis* pour agir. Pour certaines souches de cette bactérie, le processus d'activation est altéré et elles deviennent résistantes à l'isoniazide. Le mode opératoire de la pyridomycine est plus direct, ce qui ouvre donc une piste prometteuse pour développer un antibiotique efficace contre une maladie présentant de plus en plus de résistances aux traitements à base d'isoniazide. De plus, la pyridomycine pourrait se révéler efficace contre d'autres mycobactéries, par exemple celle responsable de la lèpre.

→ S. B.

R. C. Hartkoorn et al., EMBO Molecular Medicine, en ligne, 17 septembre 2012



Des colonies de deux souches de la bactérie responsable de la tuberculose, photographiées à différents stades.

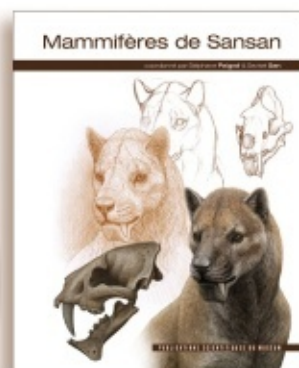


Muséum national d'Histoire naturelle

Mammifères de Sansan

Coordonné par Stéphane Peigné & Sevket Sen

Sansan (Gers, France) est un gisement exceptionnel d'âge Miocène moyen (ca. 15 Ma), et un hot spot de la biodiversité de cette époque. Depuis sa découverte, en 1834, des dizaines de milliers de fossiles y ont été découverts, documentant près de 200 espèces animales et végétales dont pour la plupart il est la localité de référence. Cette richesse et cette diversité ont valu à Sansan d'être choisi comme le gisement de référence de la zone MN 6 (Miocène moyen) de l'échelle biochronologique mammalienne du Néogène européen, reconnaissance scientifique qui dépasse largement les limites de notre continent. Depuis la monographie d'Édouard Lartet en 1851, les fossiles de Sansan, en particulier les mammifères, ont fait l'objet de nombreuses études et ont servi de matériel de comparaison pour la détermination de fossiles découverts en Europe et ailleurs. L'intérêt des paléontologues pour la faune de Sansan et l'évolution des connaissances sur la systématique et la phylogénie des vertébrés actuels et fossiles ont rendu indispensable la mise à jour de nos connaissances sur la faune de ce site. Ce second volume présente la première révision de la faune des mammifères de Sansan depuis la monographie d'Henri Filhol, en 1890. Les 16 chapitres qui composent ce mémoire proposent une revue détaillée de la très grande majorité des 80 espèces connues à Sansan (Chiroptera, Rodentia, Artiodactyla, Perissodactyla, Carnivora, Primates) ainsi qu'une analyse paléoécologique de la faune.



711 p. • 1408 figs • ISBN 978-2-85653-681-0 • 119 € TTC

ouvrage en vente dans notre librairie face à la Grande Galerie de l'Évolution

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES DU MUSÉUM

Commandes et renseignements :

Muséum national d'Histoire naturelle

Publications Scientifiques

Case postale 41 • 57 rue Cuvier • 75231 Paris cedex 05

Tél. : 01 40 79 48 05 • Fax : 01 40 79 38 40

diff.pub@mnhn.fr • http://www.mnhn.fr/pubsci

Météorologie

L'orage préfère les sols secs

Comment se forme un orage ? Des mouvements ascendants d'air chaud et humide créent une perturbation qui peut donner des précipitations, dites convectives ou orageuses. Si on comprend bien le phénomène global, l'influence précise de l'humidité du sol, à l'échelle locale, n'est pas clairement établie dans le déclenchement des orages. Christopher Taylor, du Centre NERC d'écologie et d'hydrologie en Grande-Bretagne, Françoise Guichard, du Centre national de recherche météorologique (CNRS et Météo-France), et leurs collègues ont montré que les précipitations ont lieu de préférence sur les zones localement les plus sèches. Pour quelle raison ? D'une part, les masses d'air convergent des zones humides, plus fraîches, vers les zones sèches, plus chaudes. D'autre part, les courants ascendants sont plus puissants au-dessus des zones sèches. Ces mécanismes se révèlent plus marqués dans les régions semi-arides telles que le Sahel et l'Australie. Or les principaux modèles numériques du climat reproduisent mal ce phénomène : les simulations actuelles pourraient donc surestimer localement les épisodes de sécheresse.

→ S. B.

C. M. Taylor et al., *Nature*, en ligne, 12 septembre 2012

Un orage au Sahel, près de Hombori au Mali.

Archéologie

Un atelier préhistorique

Dans une grotte, l'usage de l'espace est vite brouillé par les occupations successives. Ce n'est pas le cas d'un site en plein air qui n'a été occupé qu'une fois. À Breitenbach, près de Zeitz en Allemagne, des conditions exceptionnelles de conservation dans un sol loessique ont livré l'organisation spatiale d'un atelier de sculpteurs d'ivoire datant de l'Aurignacien (40 000 à 30 000 ans avant notre ère). Autour d'Olaf Jöris, du Centre de recherche archéologique Monrepos à Neuwied, une équipe internationale fouille cette station de plein air où des premiers Européens modernes sont venus exploiter des carcasses de mammouths. L'équipe a identifié un espace où l'ivoire était débité en lamelles et un autre, reconnaissable à des accumulations de petits éclats spécifiques, où on le sculptait. Ainsi, il semble que dès l'Aurignacien, l'organisation spatiale de la production était un trait culturel de nos ancêtres européens. Rien n'indique pour le moment que ce trait ait été partagé par les Néandertaliens, leurs prédécesseurs en Europe.

→ F. S.

Physique

Gouttes à décollement vertical

Les physiciens nomment « goutte de Leidenfrost » une goutte lévitant sur le coussin gazeux produit par sa vaporisation au contact d'une surface chaude. Franck Celestini, de l'Université de Nice-Sophia-Antipolis, et deux collègues viennent de modéliser et d'observer le comportement d'une telle goutte à la fin de sa lévitation : elle s'envole !

La modélisation d'une goutte de Leidenfrost repose sur l'idée que son poids est équilibré par la surpression créée par le flux de vapeur qui s'écoule horizontalement sous sa surface de contact avec la surface chaude (son « ventre »). Cette surpression est proportionnelle à la différence de température entre la plaque et la goutte, et à la pression au sein de cette dernière. Tant que le diamètre de son ventre reste grand par rapport à la hauteur de sustentation, la goutte lévite en rétrécissant lentement, tandis que la vapeur s'évacue horizontalement.

On pensait que cette lévitation se poursuivait jusqu'à la vaporisation complète du liquide. Mais les chercheurs ont découvert qu'une fois assez petite, la goutte se transforme en une petite fusée. En effet, quand la largeur du ventre devient plus petite que l'altitude, le comportement du système change radicalement, car le poids devient nettement plus petit que la poussée verticale due à la vapeur.

La goutte décolle alors, poussée par la vapeur qu'elle émet !

Pour observer ce processus, les chercheurs ont positionné une caméra rapide face à une plaque de silicium portée à 375 °C, sur laquelle ils ont fait tomber un aérosol de gouttelettes d'eau submillimétriques à température ambiante. Après l'atterrissage suivi d'un rebond, ces gouttelettes se stabilisent en lévitation à une hauteur de moins de 20 micromètres, inférieure au diamètre de la surface de contact (de l'ordre du rayon de la goutte). Les images montrent que quand le rayon des gouttes devient inférieur à la hauteur de lévitation pendant le régime stable, elles décollent tout en continuant à s'évaporer. L'observation d'un grand nombre de cas montre que les gouttes se repositionnent (brièvement) à une altitude inversement proportionnelle à leur rayon, comme le prédisent les calculs.

Si l'on remplace l'eau par l'alcool, des gouttelettes submillimétriques n'atteignent jamais la surface, mais s'élèvent directement : elles entrent sans transition dans le régime inédit découvert par les chercheurs. Il suffit en effet de 2,6 fois moins d'énergie pour vaporiser la même masse d'alcool, de sorte qu'une gouttelette submillimétrique d'alcool se vaporise trop vite pour qu'elle puisse léviter.

→ F. S.

Physical Review Letters, vol. 109, 034501, 2012



Une goutte d'azote liquide en lévitation sur une surface chaude. Elle est sustentée par la vapeur émise au niveau de sa face inférieure.

Astrophysique

En orbite près du trou noir

Plusieurs étoiles tournent à des vitesses de l'ordre de 10 000 kilomètres par seconde autour du trou noir supermassif logé au centre de notre Galaxie. L'étoile SO-2 était, jusqu'à présent, celle dont la période de révolution était la plus courte connue, de l'ordre de 16 ans. Grâce à un suivi du centre galactique de 1995 à 2012 par l'Observatoire Keck à Hawaï, Leonhard Meyer, de l'Université de Californie à Los Angeles, et ses collègues ont montré que l'étoile SO-102 bat un nouveau record : elle effectue une révolution en 11,5 ans. L'étude de SO-2 avait permis d'estimer la masse du trou noir central à environ 4 millions de fois la masse du Soleil. L'étude conjointe des deux étoiles en orbite proche autour du trou noir central devrait, à terme, fournir un test de la théorie de la relativité générale dans un régime inexploré jusqu'ici – en exploitant deux effets de la courbure de l'espace-temps créée par le trou noir : une étoile satellite a une trajectoire qui dévie de l'orbite képlérienne classique (une ellipse) et la lumière qu'elle émet est distordue.

→ S. B.

L. Meyer et al., *Science*, vol. 338, pp. 84-87, 2012

Neurobiologie

De l'ADN fœtal dans le cerveau

La plupart des mères auraient de l'ADN de leur fœtus dans le cerveau. C'est la conclusion d'une étude menée par William Chan, de l'Université de l'Alberta, au Canada, et ses collègues. Les biologistes ont autopsié des femmes ayant eu un enfant mâle et ont montré que 63 pour cent d'entre elles avaient des cellules cérébrales contenant des fragments de chromosomes Y, vraisemblablement issus du fœtus.

Un tel phénomène, nommé microchimérisme fœtal, était connu pour le sang, mais pas pour le cerveau. W. Chan et ses collègues pensent que le matériel génétique du fœtus a pénétré dans le cerveau maternel à la faveur de modifications de la barrière hémato-encéphalique (la barrière physiologique qui sépare le sang du système nerveux central) dues à la grossesse. Le microchimérisme peut avoir à la fois des conséquences positives, telle une meilleure réparation de tissus endommagés, ou négatives – il semble favoriser certaines maladies auto-immunes.

→ G. J.

W. Chan et al., *Plos ONE*, en ligne le 26 septembre 2012

Physiologie

Le rat qui peut changer de peau

Un lézard peut échapper à un prédateur en se désolidarisant de sa queue ; l'appendice repoussera ensuite. On sait moins que certains mammifères utilisent une stratégie similaire. De fait, les rats épineux (des rongeurs du genre *Acomys*) peuvent, en agitant leur queue, projeter des lambeaux de la peau qui la recouvre. Mais il y a plus étonnant encore : l'équipe de Ashley Seifert, de l'Université de Floride à Gainesville, a montré que ces animaux peuvent supporter la perte de grands pans de la peau du corps : elle se régénère complètement en un mois environ.

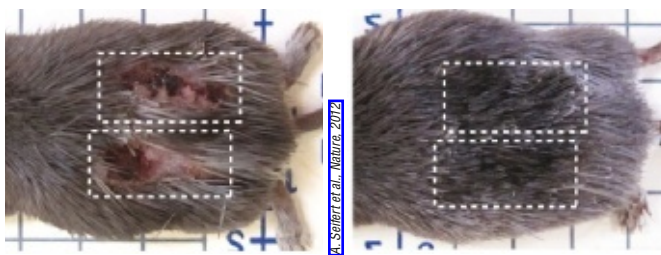
Les rats épineux doivent leur nom à leurs poils, qui peuvent être durs, voire piquants. Des observations avaient déjà montré que la peau de leur queue est faiblement attachée aux muscles et aux os sous-jacents, ce qui explique la facilité avec laquelle elle se détache. Les biologistes ont voulu en savoir plus et se sont intéressés à deux espèces, *Acomys kempfi* et *A. percivali*. Les spé-

cimens recueillis perdaient jusqu'à 60 pour cent de la peau du dos lorsqu'ils étaient manipulés ! Le processus de régénération a été étudié à partir de trous faits dans l'oreille.

Chez les souris communes (*Mus musculus*), l'ablation d'un morceau de peau entraîne la formation d'un tissu cicatriciel informe et glabre. À l'inverse, chez les rats épineux, la peau de remplacement qui se forme est presque identique à celle qui a été perdue : on retrouve l'épiderme et le derme, des follicules pileux et les poils qu'ils fabriquent, des glandes sudoripares... Seule différence, les muscles ne sont pas reconstitués.

Les mécanismes ne sont pas encore bien connus, mais les premiers résultats montrent qu'ils ressemblent à ceux mis en jeu dans la régénération des membres entiers chez certains reptiles, notamment les salamandres. Un tel phénomène chez des mammifères est inédit.

→ L. M.

A. Seifert et al., *Nature*, vol. 489, pp. 561-565, 2012

La régénération de la peau disparue (à gauche) dure une trentaine de jours.

DERNIÈRE minute ...

VESTA, UN ASTÉROÏDE MAGNÉTIQUE

Une météorite découverte en Antarctique proviendrait de l'astéroïde Vesta : leur composition isotopique en oxygène est la même. Et la structure cristalline de la météorite indique que, il y a 3,69 milliards d'années, Vesta était dotée d'un champ magnétique, probablement dû à un cœur de métal liquide agissant comme une dynamo. Ce résultat corrobore l'hypothèse qu'un

champ magnétique aurait protégé du vent solaire la surface très peu abîmée de cet astéroïde.

UN CERVEAU TRÈS ANCIEN

Environ 520 millions d'années : c'est l'âge du plus ancien cerveau découvert. Il appartenait à un individu de l'espèce *Fuxianhuia protensa*, un arthropode aujourd'hui éteint (les arthropodes comprennent les crustacés, les araignées, les

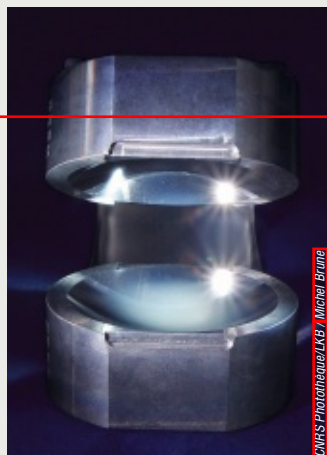
insectes...). L'animal mesurait un peu moins de huit centimètres de longueur et avait un corps assez simple. Sur son fossile, mis au jour en Chine, on distingue nettement des structures cérébrales complexes.

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

Prix Nobel de physique

Des systèmes quantiques de quelques atomes et photons

Serge Haroche, professeur au Collège de France et chercheur au Laboratoire Kastler Brossel, à Paris, qui dépend de l'École normale supérieure, du CNRS et de l'Université Pierre et Marie Curie, et David Wineland, chercheur de l'Institut américain des étalons et de la technologie (NIST) à Boulder, aux États-Unis, ont reçu le prix Nobel de physique pour leurs travaux expérimentaux sur l'optique quantique. Le comité Nobel a souligné leur contribution essentielle dans la conception de dispositifs permettant de contrôler et mesurer des systèmes quantiques dont les applications vont des horloges de précision à l'élaboration de futurs ordinateurs quantiques.



Une cavité formée de deux miroirs supraconducteurs (donc ultraréfléchissants) se faisant face permet de piéger des photons sur une longue durée.

S. Haroche et ses collègues ont, en particulier, conçu des systèmes de cavités supraconductrices contenant quelques photons piégés par deux miroirs ultraréfléchissants se faisant face. La technique mise en place par S. Haroche permet d'obtenir l'information sur les photons par un changement d'état d'atomes injectés dans la cavité, sans détruire les photons. Ce dispositif a permis d'étudier le phénomène de décohérence, c'est-à-dire le passage d'un comportement quantique d'un système, qui peut être dans une superposition d'états – comme le chat à la fois mort et vivant de l'expérience de pensée du physicien autrichien Erwin Schrödinger – à un comportement classique. Avec

ces expériences, S. Haroche a aussi démontré la possibilité de manipuler des états quantiques dans des cavités supraconductrices, manipulations que certains physiciens cherchent à exploiter pour réaliser des ordinateurs quantiques.

Les expériences de D. Wineland et ses collègues sont complémentaires de celles de S. Haroche. Le physicien américain a conçu des pièges à ions, dont il contrôle, avec précision, l'état quantique grâce à des photons. D. Wineland a ainsi pu mettre en place des opérations élémentaires de calcul quantique, à la base d'un futur et encore hypothétique ordinateur quantique.

→ S. B.

<http://bit.ly/UHunn9>

Prix Nobel de médecine

Des cellules réinitialisées

Les deux lauréats, le Britannique John Gurdon et le Japonais Shinya Yamanaka, ont découvert que l'on peut obtenir des cellules souches, encore non différenciées, à partir de cellules adultes déjà spécialisées. Leurs travaux bousculent ce que l'on pensait des cellules souches et élargissent les possibilités d'utilisation de ces dernières. Aujourd'hui, on peut obtenir de telles cellules souches en reprogrammant « simplement » des cellules adultes.

Dans les années 1960, J. Gurdon, de l'Université de Cambridge, révéla que la spécialisation des cellules est réversible. Un ovocyte d'amphibien dont il avait remplacé le noyau par celui d'une cellule intestinale s'est correctement développé en un animal adulte. Cette méthode a ensuite été appliquée pour cloner des animaux, le premier étant la brebis Dolly, en 1997. Au début des années 2000, S. Yamanaka, de l'Université de Tokyo, s'est affranchi du transfert de noyau. Il a reprogrammé des cellules adultes de souris en cellules souches en y introduisant quatre gènes grâce à des rétrovirus. Ces cellules souches sont dites induites et notées iPS (pour *Induced pluripotent stem cells*). Le résultat a été reproduit chez l'homme en 2007. Mais les cellules manipulées deviennent parfois cancéreuses, les gènes s'insérant aléatoirement dans le génome et certains étant des inducteurs de tumeurs. Aujourd'hui, la méthode a été améliorée : on peut limiter la cancérogenèse, et n'insérer qu'un seul gène au lieu de quatre.

Les cellules iPS sont si prometteuses que Ian Wilmut, le père de Dolly, a renoncé au clonage pour se consacrer à ce nouveau domaine.

→ L. M.

http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/2012

Prix Nobel de chimie

Les récepteurs à protéines G

Comment nos cellules perçoivent-elles l'environnement ? En grande partie grâce aux « récepteurs couplés aux protéines G » (notés RCPG) dont la structure a été élucidée par les deux lauréats, les Américains Robert Lefkowitz et Brian Kobilka. Il s'agit de récepteurs insérés dans la membrane des cellules et qui transmettent de l'information de l'extérieur vers l'intérieur.

Lorsqu'un signal extérieur (protéine, petite molécule messagère, phéromone, ion, voire photon) s'associe au récepteur, la forme de ce dernier est modifiée : sa partie intracellulaire peut alors se lier à une protéine dite G. Cette association a pour conséquence le remplacement d'une molécule de GDP (de la famille de l'ATP et à qui l'on doit le nom de protéine G) par une autre, nommée GTP. C'est la première étape d'une cascade de réactions qui conduit à la réponse de la cellule au signal.

R. Lefkowitz, de l'Institut médical Howard Hughes, s'intéresse depuis les années 1960 aux récepteurs. Son équipe a identifié plusieurs RCPG, dont ceux qui reconnaissent l'adrénaline et la noradrénaline. Dans les années 1980, elle recrute B. Kobilka, aujourd'hui à l'Université Stanford, pour qu'il isole le gène d'un RCPG (un récepteur β -adrénergique) chez l'homme. La séquence de ce gène étant étonnamment proche de celle correspondant à un récepteur photosensible de l'œil, les récipiendaires du prix purent en déduire que les RCPG constituent une grande famille de protéines aux structures et aux mécanismes de fonctionnement très voisins. Aujourd'hui, environ la moitié des médicaments, par exemple les bêtabloquants, auraient pour cible directe ou indirecte les RCPG !

→ L. M.

http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2012

POINT DE VUE

Attention à la notion de culture en politique !

Qu'est-ce que la notion de culture ? Utilisée abondamment par les politiciens de tous bords, elle s'est vidée de son sens scientifique pour prendre un tour polémique.

Régis MEYRAN

Depuis quelques années, une notion issue des sciences sociales a fait son entrée dans la sphère politique : la culture. Aujourd'hui, la tendance se renforce à travers presque tout l'ensemble du spectre politique : certains promeuvent la « culture française » ou défendent les « valeurs culturelles françaises et européennes » pour lutter contre le « malaise identitaire des Français », d'autres parlent d'« insécurité culturelle »... Ainsi a-t-on pu entendre récemment que le double meurtre d'Échirolles, fin septembre, pouvait s'expliquer par les particularités culturelles des banlieues. Dans tous ces cas de figure, le mot devient envahissant et son usage de plus en plus imprécis.

La notion de culture (*Kultur*) fut inventée au milieu du XIX^e siècle par des philologues allemands à la suite des travaux de Wilhelm von Humboldt, dans une optique à la fois nationaliste et antiraciste. Elle caractérisait au départ la « communauté spirituelle » (*Volksgeist*) formée par le peuple allemand, en particulier grâce à l'usage de la langue – sorte d'inconscient collectif supposé représenter l'esprit d'un peuple, et véhiculant un découpage particulier de la réalité. Or, au cours du développement de l'anthropologie comme science autonome, entre la fin du XIX^e siècle et jusqu'à la moitié du XX^e, avec chronologiquement Edward Tylor en Angleterre, Franz Boas aux États-Unis et Claude Lévi-Strauss en France, cette notion a été remaniée pour décrire les particularités des sociétés exotiques et traditionnelles, autrefois qualifiées de « primitives ».

Ces sociétés, qui ont tendance à disparaître de même que leurs langues et leurs productions matérielles ou intellectuelles, vivaient dans un temps cyclique, centré sur les mythes et les rites traditionnels. Il s'agit bien entendu d'un modèle théorique, mais des écarts existent indéniablement entre ces peuples à historicité lente (« sociétés froides » comme les nommait Lévi-Strauss) et la majorité des peuples contemporains, vivant dans un temps linéaire et dans un espace globalisé (« sociétés chaudes »). Quoi qu'il en soit, les anthropologues conviennent aujourd'hui par commodité, à la suite de Tylor, qu'une culture (traditionnelle) est constituée d'un ensemble de savoirs, de croyances, d'arts, de morale, de lois et,

AU RISQUE D'AMBIGUÏTÉ,
voire de contresens, les politiques
devraient relire Lévi-Strauss
et Hoggart ou, *a minima*,
éviter ce terme !

à la suite de Lévi-Strauss, qu'elle s'organise en système cohérent, à l'image des langues.

Mais l'histoire de cette notion continue dans la seconde moitié du XX^e siècle, car elle est réutilisée par la sociologie, cette science qui analyse les phénomènes sociaux dans le monde occidental contemporain, c'est-à-dire dans les sociétés que n'étudient classiquement pas les ethnologues. On peut repérer alors deux utilisations. Pierre Bourdieu distingue la culture des dominants et celle des dominés – les premiers disposant d'un capital à la fois matériel, social et culturel (les façons de se tenir, de parler...)

leur permettant de perpétuer leur domination sur les autres groupes sociaux – les « dominés ». L'autre utilisation fait suite aux travaux de l'anthropologue anglais Richard Hoggart sur la « culture du pauvre » dans les années 1950. Selon lui, contrairement à une idée reçue, le peuple, usant de scepticisme ou de cynisme, sait prendre ses distances par rapport aux produits de masse qu'il consomme, en les adaptant aux valeurs de sa propre classe sociale ; en d'autres termes, il s'approprie la culture de masse et la transforme en une culture de classe. Ses recherches ont lancé les *cultural studies*, un mouvement universitaire qui a mis du temps à être reconnu en France, proposant l'étude des cultures « dominées » (aussi nommées subcultures), c'est-à-dire l'ensemble des règles de conduite qui caractérisent des petits groupes souffrant d'une faible reconnaissance sociale ou subissant des discriminations : on parle alors d'une culture des pauvres, d'une culture ouvrière, de cultures régionales ou encore des cultures des populations récemment immigrées.

Toutefois, toutes ces « cultures » ne sont pas des notions comparables. Dans la conception anthropologique classique, un peuple se définit à la fois par ses mythes, ses rites, sa religion et sa langue. Pour ceux restés longtemps isolés des autres groupes humains, le rapport à la nature ou les conceptions relatives au fonctionnement de l'esprit et du corps pouvaient être radicalement différents, ce qui n'est pas le cas des minorités contemporaines. En outre, ces cultures ne sont pas figées et encore moins « pures », et aujourd'hui, elles ne sont plus exclusives les

unes des autres. Chacun peut être conduit à endosser différentes appartenances culturelles selon le contexte : on peut être normand et d'ascendance algérienne.

Il faut donc éviter d'utiliser ce concept à toutes les sauces. Par exemple, parler de « culture française » n'a pas vraiment de sens, car nous vivons dans un monde post-industriel où les solidarités traditionnelles (Église, famille patriarcale...) sont affaiblies, et nous sommes soumis à la mondialisation qui favorise les emprunts culturels les plus variés (ainsi, les musiques rock ou hip-hop font partie d'une culture internationale). Par ailleurs, les vagues d'immigration y sont nombreuses depuis des siècles. Il faudrait donc plutôt parler d'une culture dominante (centrée sur la langue, les symboles, les rites nationaux et l'histoire nationale, faisant l'objet d'affrontements entre différentes

élites) et d'un ensemble varié de cultures ou de subcultures dominées, selon l'acception des *cultural studies*. De même, évoquer une « culture musulmane » n'est pas rigoureux non plus, car au sein des peuples pratiquant l'islam, les disparités culturelles sont grandes : un Ouïghour chinois ne vit pas dans le même univers culturel qu'un Marocain musulman berbérophone !

La culture est une notion définie par les anthropologues et les sociologues dans le cadre de leurs recherches. L'utiliser hors de son contexte scientifique peut vite conduire à des relectures tendancieuses de la notion de culture. Ainsi, un poncif traverse désormais presque tout le champ politique français, selon lequel les cultures, supposées nationales et religieuses, ne doivent pas se mélanger entre elles afin de conserver leur vitalité. Ce « différentialisme culturel ».

qui prétend lutter contre un supposé sentiment d'« insécurité culturelle » chez nos concitoyens, ne reflète aucune réalité et relève d'une nouvelle forme de racisme : il consiste à enfermer chaque nation dans une culture nationale dominante figée. Au risque d'ambiguïté, voire de contresens, les politiques devraient relire Lévi-Strauss et Hoggart ou, *a minima*, éviter ce terme ! ■

Régis MEYRAN est docteur de l'EHESS. Anthropologue et historien de l'anthropologie, il prépare, avec le sociologue Valéry Rasplus, un livre sur le culturalisme en politique (à paraître en 2013).

R. Meyran, *Le mythe de l'identité nationale*, Berg International, 2009.



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

DÉVELOPPEMENT DURABLE

Peut-on recycler à l'infini ?

La limitation en matières premières sera-t-elle résolue par un recyclage infini, où l'on réutiliserait toujours les mêmes matériaux ? C'est peu probable, les matériaux se dégradant à chaque cycle, et les techniques de recyclage coûtant cher...

Alain GELDRON

Dans une économie dite circulaire, on remettrait dans le circuit de la matière tout ce que l'on a consommé, au lieu de le brûler ou de l'envoyer à la décharge. C'est un modèle vers lequel il faut tendre, dans le contexte actuel de pénurie et d'augmentation importante du prix de certaines ressources. Le recyclage est donc de plus en plus crucial, mais une question se pose : quelles sont ses limites ?

Elles sont d'abord technico-économiques : plus les techniques sont complexes, plus elles sont coûteuses. Cependant, le progrès technique et l'augmentation du prix de la matière peuvent rendre rentable un

type de recyclage qui ne l'était pas auparavant. C'est aussi ce qui se produit avec les matières premières minérales et les produits pétroliers, où certains gisements (tels les gisements marins en eau profonde), autrefois trop chers ou trop peu accessibles, sont devenus exploitables.

Les limites sont aussi techniques, liées à la complexité des flux de produits à recycler et à la dégradation de la matière. Les matériaux constitutifs d'un produit, extraits de gisements (fer, cuivre...) ou synthétisés (polyéthylène, PVC...), perdent leur pureté dès les premiers stades de la fabrication : pour obtenir les propriétés physiques, mécaniques ou chimiques recherchées, ils sont

mélangés de multiples façons et dotés de divers additifs. Les matériaux résultants sont ensuite assemblés en composants, puis en un produit final.

A chaque stade (élaboration de l'alliage, création des composants, assemblage du produit, collecte de déchets divers), la complexité est multipliée : même si les produits sont fabriqués à partir d'un nombre assez limité de briques élémentaires, celles-ci sont associées en plusieurs millions de combinaisons. Les déchets (tels des écrans d'ordinateur et de télévision) sont alors des assemblages hétéroclites, qu'il faut défaire avant le recyclage, une tâche compliquée par leur grande variabilité.



→ pouirlascience.naturejobs.com

Nouveau service d'offres d'emplois scientifiques sur

POUR LA SCIENCE

en partenariat avec **naturejobs**



- Chaque semaine, plus de **8000 offres d'emploi** dans le secteur des sciences.
- En un clic la **sélection des postes à pourvoir en France** et dans les pays francophones ou voisins.
- Une équipe Naturejobs spécialisée, **au service des recruteurs francophones**.
Contact : Muriel Lestringuez
E-mail : m.lestringuez@nature.com
Tél. : +44 20 7843 4994

POUR LA SCIENCE.fr

Le site de référence de l'actualité scientifique

Etant issus de mélanges, les matériaux produits par le recyclage sont le plus souvent contaminés par des éléments divers, même après le tri et le traitement. C'est notamment le cas de l'acier recyclé, où se mêlent plusieurs « nuances » (des aciers ayant des teneurs différentes en carbone, en molybdène, en vanadium...) et d'autres composants, tel du cuivre. Provenant par exemple des petits bobinages de moteurs électriques automobiles (utilisés pour les lave-vitres, le réglage des sièges, etc.), ce dernier est difficile à séparer de l'acier. En conséquence, l'acier recyclé a de moins bonnes propriétés mécaniques que le « neuf ». Le même problème se pose pour le polyéthylène, utilisé par exemple pour les emballages plastiques : de multiples éléments y sont ajoutés (telles des argiles, qui le rigidifient), compliquant sa purification.

Le recyclage des matières organiques (plastiques, papier...) est soumis à un problème supplémentaire par rapport à celui des matières minérales (métaux, verre...) : les chaînes carbonées se cassent, entraînant une dégradation accrue. Dès lors, les défauts s'accumulent au cours des cycles successifs. Ainsi, l'acier peut contenir de plus en plus de cuivre à mesure des recyclages, tandis que les fibres du papier deviennent trop fragmentées pour être utilisables en cinq à dix cycles. En raison de leur qualité souvent inférieure, les matériaux recyclés sont en général utilisés pour des produits différents du produit d'origine. On parle de recyclage en boucle ouverte.

Par ailleurs, la réflexion sur un recyclage infini doit intégrer la question des débouchés. En période de croissance, où la demande augmente, les matériaux issus du recyclage trouvent preneurs (à condition que leur prix soit compétitif). Ce n'est pas toujours le cas lorsque la demande diminue : ainsi, lors de la crise de fin 2007 et début 2008, les achats de ferrailles (les débris de pièces de fer, de fonte ou d'acier) se sont totalement arrêtés pendant plusieurs semaines en France. En outre, l'utilisation de certaines substances contenues dans les produits à recycler, tels le cadmium,

le mercure ou les additifs bromés des plastiques, est parfois restreinte ou interdite.

Pour recycler la totalité de nos déchets, il faudrait donc que la demande soit croissante, afin de disposer de débouchés adaptés à la qualité des matériaux recyclés, ou qu'elle soit constante et que les technologies permettent d'obtenir des matériaux recyclés de qualité identique à ceux d'origine.

LA QUALITÉ DES MATÉRIAUX
que l'on peut obtenir est limitée par le coût et par l'impact sur l'environnement.

Diverses techniques peuvent fournir des matériaux de haute qualité. Ainsi, on sait récupérer du cuivre pur à 99,9 pour cent par électrolyse. Cependant, cette technique est gourmande en énergie. De façon générale, la qualité des matériaux que l'on peut obtenir est limitée par le coût et par l'impact sur l'environnement. Les techniques de recyclage consomment de l'énergie (broyage, fusion...), émettent des gaz à effets de serre, répandent des polluants dans l'eau (notamment lors du désencrage des papiers)... Toutefois, l'impact est presque toujours moindre que si les mêmes matériaux étaient produits d'une autre façon.

Pour minimiser l'impact sur l'environnement, la directive européenne sur les déchets préconise de réemployer les composants et les produits, plutôt que de revenir aux matériaux bruts. Cela présente en outre un avantage économique, celui de conserver le plus longtemps possible la valeur ajoutée des produits : un ordinateur a plus de valeur que les matériaux à recycler qui le composent.

Finalement, l'idée du recyclage infini semble illusoire, en raison des contraintes technico-économiques. Elle doit malgré tout guider les efforts visant à limiter notre impact sur l'environnement...

Alain GELDRON dirige le Service Filières responsabilité élargie du producteur et recyclage, à l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie).

GRENOBLE SCIENCES

■ CONSEIL ET EXPERTISE ■ LABELLISATION ■ ÉDITION

■ *Grenoble Sciences* est un label de qualité attribué aux projets qui ont traversé avec succès l'expertise par référés anonymes, l'interaction du comité de lecture et l'optimisation par les experts de *Grenoble Sciences*.

<http://grenoble-sciences.ujf-grenoble.fr>

MATHÉMATIQUES

SCIENCES DE LA VIE

SCIENCES DE LA VIE ET DE LA SANTÉ

SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

ANGLAIS DE SPÉCIALITÉ

SCIENCES DE LA MATIÈRE

ÉVOLUTION DES IDÉES SCIENTIFIQUES

■ *Grenoble Sciences* favorise l'édition en français et les ouvrages les plus adaptés sont ensuite traduits en langue anglaise en respectant la même démarche de comité interactif d'experts.



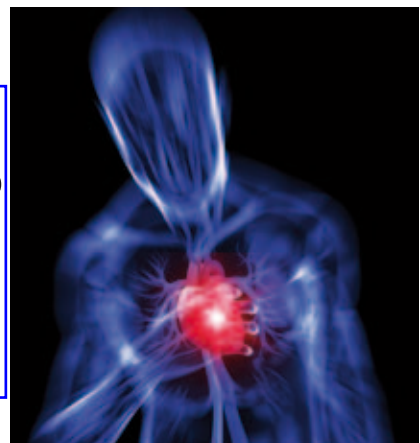
■ Certains projets sont créés directement en langue anglaise lorsque le public francophone est trop restreint.

VRAI OU FAUX

Les estrogènes protègent-ils des maladies cardio-vasculaires ?

Malgré certains effets bénéfiques, leur rôle protecteur n'est pas établi, et leur administration n'est plus recommandée à titre préventif lors de la ménopause.

Pierre-Yves Scarabin



Les femmes semblent relativement épargnées par les maladies cardio-vasculaires : à 50 ans, par exemple, elles sont deux à trois fois moins victimes que les hommes de ces maladies, causées notamment par l'obstruction d'une artère. La différence s'estompe après la ménopause, mais ne disparaît pas. Comment s'explique-t-elle ?

De multiples pistes ont été explorées. L'une d'elles concernait des facteurs génétiques ; elle s'est soldée par un échec. Une deuxième piste pointe des inégalités par rapport aux principaux facteurs de risque cardio-vasculaire : tabagisme, hypertension artérielle et hypercholestérolémie. De nombreuses études ont montré que les femmes ont un profil plus favorable, notamment parce qu'elles font plus attention à leur santé. Cela explique en partie – mais pas totalement – les différences.

On a aussi envisagé un rôle des hormones, en particulier des estrogènes. Ces derniers jouent un rôle clef dans le développement sexuel et la reproduction chez la femme. À la ménopause, l'arrêt du fonctionnement des ovaires entraîne une chute importante des concentrations sanguines d'estrogènes. On constate alors une augmentation rapide du risque cardio-vasculaire, ce qui fait penser à la perte d'un facteur protecteur.

De fait, plusieurs effets bénéfiques des estrogènes ont été mis en évidence sur des modèles animaux. Ces hormones limiteraient l'athérosclérose (un dépôt graisseux sur les parois des artères, aboutissant parfois à leur

obstruction). Elles amélioreraient aussi la circulation sanguine et l'oxygénation des tissus.

Cependant, ces résultats n'ont pas été confirmés chez l'homme. Les estrogènes ont de multiples fonctions et leurs effets, bénéfiques ou délétères, varient notablement, en particulier selon l'âge et les organes. L'impact de la carence en estrogènes sur l'augmentation du risque cardio-vasculaire après la ménopause reste à prouver : les importantes modifications liées au vieillissement survenant après 50 ans (augmentation du poids et de la pression artérielle, hypercholestérolémie, etc.) pourraient aussi participer à cet accroissement du risque.

De vastes essais non concluants

Plusieurs arguments plaident même en défaveur d'un effet cardio-protecteur des estrogènes. De vastes essais, où l'on administrait des estrogènes à des femmes ménopausées, ont été réalisés aux États-Unis au début des années 2000. Ils n'ont révélé aucune réduction du risque cardio-vasculaire. Ces hormones ont aussi été testées sur des hommes... sans succès ! Avant ces travaux, on préconisait un traitement hormonal (comprenant notamment des estrogènes) lors de la ménopause, afin de prévenir les maladies chroniques (maladies cardio-vasculaires, ostéoporose, démence...) ; ce traitement n'est plus recommandé, sauf en cas de troubles tels que les bouffées de chaleur.

Chez les femmes ménopausées, les estrogènes continuent de circuler dans le sang à de faibles concentrations. Ils pourraient protéger les femmes peu après la ménopause, mais ils auraient un rôle délétère à un âge plus avancé. Des concentrations sanguines élevées d'estrogènes après 65 ans sont corrélées à un risque accru d'infarctus du myocarde ou d'accident vasculaire cérébral, sans que le lien de cause à effet ne soit démontré. D'autres résultats suggèrent que les estrogènes favorisent l'obstruction des artères, par exemple en entraînant la formation de caillots sanguins.

En fait, on ignore si les estrogènes ont réellement un impact sur les maladies cardio-vasculaires. Notons que ces maladies constituent la première cause de mortalité chez les femmes : en France, 85 000 d'entre elles en meurent chaque année (le cancer du sein fait huit fois moins de victimes). Les femmes meurent même plus souvent que les hommes de maladies cardio-vasculaires, bien que le risque soit plus faible quand on compare les hommes et les femmes ayant le même âge. Cet apparent paradoxe est dû à la plus grande longévité des femmes et à la survenue tardive de ces maladies. Quel que soit le sexe, les facteurs de risque doivent donc être surveillés, et des stratégies de prévention mises en œuvre. Elles visent à limiter les facteurs de risque par des approches pharmacologiques et une meilleure hygiène de vie... ■

Pierre-Yves SCARABIN est directeur de recherche à l'INSERM, à Villejuif.

Offen für alle zugänglich und nutzbar
S421 • 2013



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

✓ POURQUOI PAS DE MASSE ?

Selon l'article *Le boson de Higgs, et après ?* (*Pour la Science* n° 419, septembre 2012, http://bit.ly/419_higgs), les particules n'ont pas de masse dans le modèle standard. Mais pourquoi ? La masse n'est-elle pas indispensable pour décrire la trajectoire d'une particule chargée lors d'une collision ?

Andrea Kapka, Paris

→ RÉPONSE D'OLIVIER ARNAEZ

CERN / Université de Mayence

Les équations de la dynamique classique ou relativiste nécessitent bien une masse pour décrire les trajectoires, mais c'est une approche différente de celle du modèle standard, qui vise à décrire l'ensemble des interactions des particules, et pas uniquement leurs mouvements. Les phénomènes de désintégration, en particulier, ne peuvent pas être décrits par les équations de la dynamique. Le modèle standard fournit

un cadre mathématique pour représenter les particules et leurs interactions. Ce formalisme repose sur des règles de symétries et traite des quantités intrinsèques associées aux particules, les « charges ». L'introduction de la masse comme propriété intrinsèque n'est pas possible dans ce cadre, car elle ne respecte pas certaines symétries. On résout cette difficulté en introduisant le mécanisme de Higgs (matérialisé par une nouvelle particule, le boson de Higgs). La masse est alors une propriété effective, qui provient de l'interaction de la particule avec le champ de Higgs.

✓ DES ROCHES, MAIS LESQUELLES ?

Le rover *Curiosity* s'est posé sur Mars à la recherche de traces de vie (voir *Déchiffrer la planète rouge* (*Pour la Science* n° 418, août 2012, http://bit.ly/418_curiosity). Quels types de roches sont les plus prometteurs ?

Georges Wattelse, Gand

→ RÉPONSE DE FRANÇOIS FORGET

Laboratoire de météorologie dynamique, Université Paris 6/CNRS

Les roches qui intéresseront le plus *Curiosity* sont les argiles. Communes sur Terre, elles restent assez rares sur Mars et n'ont été découvertes que récemment par la sonde *Mars Express*. Leur formation requiert *a priori* une longue altération par de l'eau liquide. Elles forment aussi des petites cellules autour des impuretés, qui peuvent protéger des molécules organiques ou des microfossiles. Le cratère Gale, que va explorer *Curiosity*, abrite une haute montagne de sédiments. Des affleurements d'argiles riches en fer (nontronites) ont été identifiés près de la base du pic, dans les terrains anciens. Un peu au-dessus se trouvent des sulfates, eux aussi probables signatures de l'eau liquide. Le cratère Gale est peut-être un ancien lac où des sédiments se sont accumulés. Cependant, il pourrait aussi s'agir de sédiments volcaniques altérés par une circulation hydrothermale.

universcience présente

les conférences

entrée libre
JUSQU'EN DÉCEMBRE 2012

théma **La fin des mondes**

Est-ce pour 2012 ? D'où vient le mythe ?

Anthropologues, économistes, astrophysiciens, biologistes et même auteurs de SF partageront leur vision de l'avenir.

En partenariat avec

Avec le soutien de

program complet sur www.universcience.fr



FONDATION ÉCOLOGIE D'AVENIR
INSTITUT DE FRANCE

COLLOQUE

“ LE NUCLÉAIRE DU FUTUR ”

SOUS LA DIRECTION DE PASCAL COLOMBANI ET ROBERT KLAPISCH

71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82
La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb
Lanthanide	Hafnium	Tantalum	Tungsten	Rhénium	Osmium	Iridium	Platinum	Or	Mercure	Thallium	Plomb
138.91	178.49	180.95	183.84	186.21	190.23	192.22	195.08	196.97	200.59	204.38	207.2
2-8-18-32-10-2	2-8-18-32-11-2	2-8-18-32-12-2	2-8-18-32-12-2	2-8-18-32-12-2	2-8-18-32-12-2	2-8-18-32-17-1	2-8-18-32-17-1	2-8-18-32-18-1	2-8-18-32-18-2	2-8-18-32-18-3	2-8-18-32-18-4
104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115
Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Uun	Uuu	Uub	Uut	Uuq	Uup
Rutherfordium	Dubnium	Seaborgium	Bohrium	Hassium	Moscovium	Ununnilium	Unununium	Ununbium	Ununtrium	Ununquadium	Ununpentium
(261)	(262)	(266)	(264)	(265)	(269)	(281)	(272)	(285)	(284)	(289)	(288)
-18-32-32-10-2	-18-32-32-11-2	-18-32-32-12-2	-18-32-32-12-2	-18-32-32-12-2	-18-32-32-12-2	-18-32-32-17-1	-18-32-32-17-1	-18-32-32-18-1	-18-32-32-18-2	-18-32-32-18-3	-18-32-32-18-4
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er
Lanthanum	Cerium	Praseodymium	Neodyme	Prométhée	Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Holmium	Erbium
138.91	140.12	140.91	144.24	144.91	150.36	151.96	157.25	158.93	162.50	164.93	167.26
2-8-18-9-2	2-8-18-20-8-2	2-8-18-21-8-2	2-8-18-22-8-2	2-8-18-23-8-2	2-8-18-24-8-2	2-8-18-25-8-2	2-8-18-25-9-2	2-8-18-27-8-2	2-8-18-27-9-2	2-8-18-27-10-2	2-8-18-27-11-2
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm
Actinide	Thorium	Protactinium	Uranium	Neptunium	Plutonium	Americium	Curium	Berkélium	Californium	Einsteinium	Fermium
(227)	232.04	231.04	238.03	(237)	(244)	(243)	(247)	(247)	(251)	(252)	(257)
-18-32-18-10-2	-18-32-18-10-2	-18-32-20-9-2	-18-32-21-9-2	-18-32-23-8-2	-18-32-24-8-2	-18-32-25-8-2	-18-32-25-9-2	-18-32-25-9-2	-18-32-25-10-2	-18-32-25-11-2	-18-32-25-12-2

Avec la participation de :

Claude Allègre (Ancien Ministre), Carlo Rubbia (Prix Nobel de Physique),
Marcel Boiteux (Ancien Président d'EDF), Luc Oursel (Président du Directoire, AREVA),
Jacques Bouchard (CEA), Christophe Béhar (CEA), Daniel Heuer (CNRS),
Bernard Bonin (CEA), Bernard Salha (EDF)...

JEUDI 22 NOVEMBRE 2012
15H-19H

COLLÈGE DES BERNARDINS
20 RUE DE POISSY - 75005 PARIS

ENTRÉE GRATUITE WWW.FONDATIONECOLOGIEDAVENIR.ORG

Réservation conseillée - Places limitées

ENTRETIEN

Croyances : des scientifiques à contre-emploi

La montée du mysticisme traduit une influence croissante des milieux non rationalistes, mais elle est aussi alimentée par certains scientifiques.

Entretien avec Yves GINGRAS, historien et sociologue des sciences

POUR LA SCIENCE

Yves Gingras, le mysticisme semble avoir le vent en poupe, mais est-ce vraiment le cas ? A-t-on des chiffres qui l'attestent ?

→ **YVES GINGRAS** : Il est difficile de mesurer ce phénomène, mais un indice frappant est la multiplication, depuis la fin des années 1980 et surtout aux États-Unis, d'ouvrages de vulgarisation scientifique utilisant dans leur titre des mots ou expressions suggérant que la science peut résoudre les mystères profonds de l'existence, et qu'elle rejoint ainsi les « sagesse » les plus anciennes, taoïste, indienne ou bouddhiste.

Au cours des décennies récentes, la science a d'abord été perçue comme incompatible avec les croyances religieuses et accusée de désemparer le monde. Aujourd'hui, certains scientifiques la présentent, sur un ton romanesque, comme capable de répondre à notre quête de sens. Le contraste est frappant entre l'ouvrage classique de Jacques Monod, *Le hasard et la nécessité* (1970), qui affiche une vision somme toute mécaniste de l'Univers où l'être humain est un élément contingent et sans signification, et celui du chimiste Ilya Prigogine et de la philosophe Isabelle Stengers, qui préconise une « Nouvelle alliance » entre l'homme et la nature (1979). On n'est pas encore dans le mysticisme déclaré qui deviendra évident dix ans plus tard sous d'autres plumes, mais la continuité est réelle entre ces démarches qui laissent entendre que science et croyance sont du même ordre.

BIOGRAPHIE

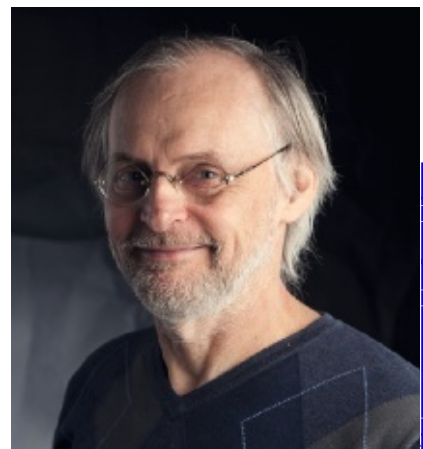
Yves GINGRAS, historien et sociologue des sciences, est professeur à l'Université du Québec à Montréal.

Y. Gingras interviendra sur la contribution des scientifiques à la montée du mysticisme lors de la 13^e rencontre « Physique et interrogations fondamentales », qui se tiendra à Paris le 24 novembre 2012 et qui portera sur *Les nouvelles lumières. Comment la physique continue d'éclairer le monde* (<http://sfp.in2p3.fr/CP/pifn/intropage.htm>).

BIBLIOGRAPHIE

Y. Gingras, *Propos sur les sciences. Entretiens avec Yanick Villedieu*, Raison d'agir, 2010.

Y. Gingras et G. Caillé, *Nouvel Âge et rhétorique de la scientificité*, *Interface*, vol. 18(2), pp. 6-8, 1997.



PLS

Vous soutenez que de nombreux scientifiques contribuent à la montée du mysticisme. Avez-vous des exemples ?

YVES GINGRAS : On peut citer *The Physics of Immortality* (1994) de l'Américain Frank Tipler, *God and the New Physics* (Dieu et la nouvelle physique) (1983) de l'Anglais Paul Davies ou encore *The God Particle* (La particule-Dieu) (1993) du prix Nobel de physique américain Leon Lederman. Il existe depuis une vingtaine d'années une multitude de tels ouvrages de vulgarisation aux titres accrocheurs et écrits par des scientifiques de renom, souvent des physiciens. La France ne fait pas exception, même si le phénomène est plus récent et, du moins pour l'instant, plus limité. Je pense à *La mélodie secrète* (1988) ou *Le cosmos et le lotus* (2011) de l'astrophysicien Trinh Xuan Thuan, à *Le tout, l'esprit et la matière* (1987) du physicien Jean Charon. Et je ne parle pas des pseudoscientifiques qui qualifient de « visage de Dieu » la distribution du rayonnement primordial de l'Univers...

Ce courant a émergé au milieu des années 1970 avec le livre *Le Tao de la physique* écrit par le physicien américain d'origine autrichienne Fridjof Capra. Cet ouvrage, où F. Capra affirmait que les équations de la théorie quantique des champs s'apparentent à d'anciens textes mystiques indiens, a eu un succès retentissant. Depuis sa parution en 1975, il n'a cessé d'être réédité.

PLS

Que reprochez-vous précisément à ce genre d'écrits ?

→ **YVES GINGRAS** : Ces livres, qui se veulent être de la vulgarisation scientifique, sont destinés au grand public et jouissent de l'aura de leurs auteurs, dont le statut et la réputation scientifiques sont acquis. Les lecteurs leur accordent donc une forte crédibilité. Or ces auteurs outrepassent leur compétence scientifique en mettant en avant des conceptions religieuses ou mystiques qui sont étrangères à la science. Ils profitent de leur image de scientifiques pour diffuser leurs opinions personnelles. Leurs livres se veulent une présentation des découvertes de la science moderne, mais leurs titres et une partie de leur contenu suggèrent, en général de façon subtile et indirecte, des liens entre la science de pointe et la spiritualité, la solution des mystères de la vie et des origines de l'Univers. Ils jouent sur l'ambiguïté, sur la fibre du mystère, comme le fait *X-Files*, série télévisée où l'on navigue constamment entre la science et les croyances paranormales. C'est également flagrant avec les spéculations, invérifiables par définition, sur les « univers parallèles ».

PLS

De telles incursions hors de la science pourraient n'être qu'une simple stratégie commerciale de la part de l'auteur ou de son éditeur, pour mieux appâter les lecteurs...

→ **YVES GINGRAS** : Quand seul le titre joue sur la corde mystique et pas le contenu, on peut croire que oui. Mais cela confirme la tendance à vouloir marier science et religion, ou du moins science et spiritualité, ce qui crée une confusion dangereuse. Et même dans cette situation, l'auteur a une responsabilité quant au choix du titre et ne peut se défaire sur son éditeur. Utiliser comme titre *The God Particle* comme l'a fait L. Lederman – ou comme l'ont fait de nombreux journaux et magazines à propos de la récente découverte au CERN du boson de Higgs – ne fait qu'entretenir la confusion entre ce qui relève de la science et ce qui relève de la spiritualité. Cela étant, l'usage stratégique des soi-disant liens entre science et religion ne se limite pas à faire mousser les ventes.

Ainsi, L. Lederman avait plutôt un but politique en publiant en 1993 son ouvrage. Les physiciens américains cherchaient à l'époque des appuis publics pour convaincre leurs autorités de ne pas mettre fin à la construction du SSC, un collisionneur de particules gigantesque et coûteux qui devait permettre de découvrir le boson de Higgs, particule clef prédite par les théoriciens.

PLS

Les scientifiques qui jouent sur le registre mystique, mais qui n'ont pas de visée stratégique, sont-ils malgré tout suspects ?

→ **YVES GINGRAS** : Chacun est libre de croire en ce qu'il veut, mais promouvoir ses convictions spirituelles en s'appuyant sur la science est, au mieux, une preuve de grande naïveté épistémologique de la part de personnalités censées être d'un haut niveau scientifique.

Il faut aussi remarquer que la vague de publication d'ouvrages de vulgarisation scientifique faisant l'amalgame entre science et religion ou mysticisme a été fortement encouragée par les activités de la fondation américaine *Templeton* créée en 1987. Ayant pour mission de promouvoir les liens entre science, théologie, spiritualité et religion, elle décerne notamment un prix annuel de plus d'un million de dollars à une personnalité ayant fait « une contribution unique à une meilleure compréhension de Dieu et des réalités spirituelles ».

Or plusieurs scientifiques, qui ne sont nullement philosophes ou théologiens, ont obtenu ce prix. Le premier fut d'ailleurs P. Davies, physicien reconnu et auteur prolifique de livres où abondent les mots *Dieu*, *science*, *esprit*, *miracle*, etc. La stratégie de la fondation de donner l'impression que science et spiritualité sont compatibles est tellement évidente qu'il était possible (je l'ai fait !) de prédire que l'astrophysicien britannique Martin Rees l'obtiendrait, ce qui fut le cas en 2011. M. Rees fait partie de ceux qui ont surinterprété le soi-disant « principe anthropique » selon lequel les constantes de la nature sont précisément calibrées pour permettre l'apparition de l'homme. Or ce principe n'est qu'une tautologie, qui consiste à dire que si le monde avait été différent, nous ne serions pas là ! Au lieu d'expliquer qu'il n'y a là aucun

mystère, on laisse planer l'idée qu'un créateur doit avoir fixé ces valeurs pour nous faire ensuite apparaître. Cela n'a rien de scientifique, mais c'est très attrayant pour les esprits qui cherchent à conforter leurs croyances religieuses ou spirituelles en se servant de la science.

PLS

Comment réagissent les autres scientifiques face à cette dérive ?

→ **YVES GINGRAS** : Ils sont plutôt indulgents envers leurs confrères, comme si une forme de corporatisme leur soufflait que tout est bon pour promouvoir les sciences. J'ai été stupéfait de lire un compte rendu du livre *The Physics of Immortality* dans la revue hebdomadaire *Science*, qui était somme toute positif et ne disait mot de l'absurdité de prétendre démontrer l'immortalité de l'âme en invoquant des équations de la théorie quantique des champs – des équations présentes dans le livre simplement pour impressionner les lecteurs. Et je n'ai pas vu beaucoup de physiciens déconstruire le *Tao de la physique* ou critiquer les interprétations abusives du « principe anthropique ». Au lieu de se contenter de dénoncer les astrologues et autres charlatans évidents, ce qui est assez facile, les scientifiques rationalistes devraient rappeler à l'ordre ceux parmi leurs collègues qui mélangent les genres. N'oublions pas que les scientifiques, malgré certaines critiques, ont encore une forte crédibilité, dont doit découler une vraie responsabilité.

PLS

Quelle attitude devraient-ils adopter ?

→ **YVES GINGRAS** : Il faut, selon moi, constamment rappeler la spécificité des sciences, dont les méthodes n'ont pas vocation à répondre à tout. L'honnêteté intellectuelle oblige à dire que l'on ne trouvera jamais Dieu dans un accélérateur de particules ! Et même quand l'objectif est juste de faire la promotion des sciences, il faut rester sur les rails. La fin ne justifie pas les moyens, même lorsqu'il s'agit de faire « aimer » les sciences. ■

Propos recueillis par Maurice Mashaal.

La conjecture

Gerhard Frey

Les décompositions en facteurs premiers de deux nombres entiers A et B sont reliées à celle de leur somme C par des lois profondes qui s'éclaircissent peu à peu.

A première vue, la conjecture ABC semble être d'une trompeuse simplicité. Elle énonce une certaine propriété sur trois nombres entiers naturels A , B et C liés par la relation la plus simple possible : $A + B = C$. Ce qu'elle affirme exactement n'est pas évident. L'idée est que si les facteurs premiers de deux nombres A et B se répètent beaucoup, il y a peu de chance pour que ce soit aussi le cas pour leur somme.

La conjecture ABC a été énoncée en 1985 par Joseph Oesterlé, de l'Université Paris VI, et David Masser, de l'Université de Bâle, en Suisse. Malgré de solides indices en faveur de la validité de cette conjecture, aucune piste de démonstration ne semblait jusqu'ici très évidente, et la preuve paraissait encore éloignée. Cependant, cela pourrait avoir changé : un mathématicien reconnu de l'Université de Kyoto, Shinichi Mochizuki, affirme aujourd'hui avoir démontré la conjecture ABC . Ses pairs ont commencé à examiner sa démonstration, très longue et faisant appel à des outils nouveaux, mais il est trop tôt pour dire si son approche a été couronnée de succès.

La preuve de la conjecture ABC apporterait une solution à de nombreux problèmes importants de la théorie des nombres. En particulier, dans sa version forte, elle entraînerait la preuve du grand théorème

de Fermat par une méthode différente de celle utilisée par Andrew Wiles et Richard Taylor en 1994.

La plupart des problèmes concernant les nombres entiers impliquent d'une façon ou d'une autre leurs facteurs premiers. Les nombres premiers sont les nombres qui ne sont divisibles que par eux-mêmes et par 1. La suite commence ainsi : 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17... À première vue, la répartition des nombres premiers semble aléatoire. Y chercher une structure occupe les mathématiciens depuis des siècles. Le « théorème des nombres premiers » fournit cependant une estimation : le nombre de nombres premiers inférieurs à n croît comme $n/\ln(n)$ lorsque n devient grand.

D'après le théorème fondamental de l'arithmétique, chaque entier naturel se décompose de façon unique en un produit de nombres premiers (à l'ordre des facteurs près). Par exemple, $6936 = 2^3 \cdot 3 \cdot 17^2$

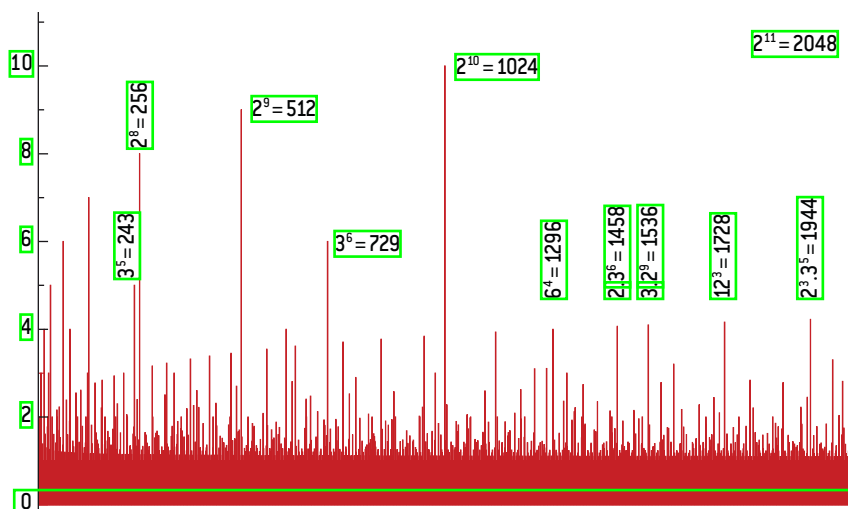
1. LA « RICHESSE » DES TRIPLETS A, B, C
d'entiers où $C = A + B$ est représentée ici pour A (en abscisse) et B (en ordonnée) compris entre 2 et 50. La couleur et la taille des cercles indiquent la valeur de la richesse $\kappa(A, B, C)$ (de 0,37, en rouge sombre, à 1,22, en blanc). Les lignes qui se dessinent suggèrent qu'en général, pour qu'un triplet d'entiers soit riche, il faut que l'un des membres le soit. On voit déjà dans cet échantillon modeste que la richesse se raréfie pour les grands nombres.

ABC

L'ESSENTIEL

- Tout nombre entier se décompose de façon unique en un produit de facteurs premiers.
- Les entiers formés de facteurs premiers portés à une puissance élevée sont qualifiés de « riches ». Ils sont assez rares.
- Il est encore plus rare que la somme de deux entiers riches soit encore riche. La conjecture ABC donne un sens précis à cet énoncé.
- Des théorèmes importants de la théorie des nombres, le théorème de Fermat notamment, découlent aisément de la conjecture ABC.
- La conjecture ABC semble vraie, mais sa démonstration se fait toujours attendre.

© Jean-François Colonna, CMAP-École polytechnique, www.lactamie.polytechnique.fr



2. LA RICHESSE D'UN NOMBRE ENTIER n , notée $\delta(n)$, correspond à la puissance moyenne des facteurs premiers qui le composent. Ce graphique montre $\delta(n)$ pour les entiers compris entre 2 et 2 048. Les nombres les plus riches sont les « puissances pures » (comme 2^{11}), suivies de près par les nombres « puissants » [tous les facteurs premiers sont à la puissance 2 au moins]. Le hasard semble régir cette distribution.

n'est divisible par aucun autre nombre premier que 2, 3 et 17.

La conjecture ABC porte sur les facteurs premiers des nombres entiers, et plus précisément sur leur diversité et leur fréquence. Un entier pris au hasard a en général peu de facteurs premiers, bien que certains soient présents plusieurs fois. Tout multiple de 9 contient par exemple deux fois au moins le facteur premier 3 (car $9 = 3^2$). Mais il est rare que la majorité des facteurs premiers apparaissent de nombreuses fois dans la décomposition. Les puissances pures, comme $67\,108\,864 = 2^{26}$, sont peu fréquentes, de même que les nombres « puissants », où chaque facteur premier apparaît avec un exposant au moins égal à 2 (comme dans $614\,810\,677 = 13^3 \cdot 23^4$). Si A et B sont deux nombres exceptionnels comportant des puissances élevées de leurs facteurs premiers, il faudrait que le diable s'en mêle pour que leur somme $A + B = C$ soit encore un entier exceptionnel. La conjecture ABC précise cet énoncé un peu flou.

Cette conjecture cache une particularité de la théorie des nombres. La structure additive des entiers naturels est particulièrement simple, et la structure multiplicative n'est guère plus compliquée. Mais les deux structures ne cohabitent pas bien : si on les combine, les choses se compliquent... et deviennent intéressantes. En d'autres termes, des propriétés de la somme $A + B$, du point de vue de la structure additive, dépendent de façon très régulière de celles de A et de B, mais du point de vue de la

structure multiplicative, cette dépendance semble presque aléatoire. Le grand théorème de Fermat, selon lequel il n'existe pas d'entiers non nuls a , b et c vérifiant l'égalité $a^n + b^n = c^n$ pour $n > 2$, mélange ainsi addition et multiplication (sous forme de puissances), pour un résultat d'une redoutable complexité.

Richesse et pauvreté chez les nombres entiers

Mais revenons à la notion de nombre exceptionnel. On dit qu'un entier est « riche » si certains de ses facteurs premiers sont présents plusieurs fois dans la décomposition (c'est-à-dire avec une puissance supérieure ou égale à deux). On l'« appauvrit » en supprimant les facteurs premiers redondants pour ne conserver qu'un seul exemplaire de chaque. Cette version dépouillée d'un entier n est appelée son radical, noté $\text{Rad}(n)$. Par exemple,

$$\text{Rad}(324) = \text{Rad}(2^2 \cdot 3^4) = 2 \cdot 3 = 6;$$

$$\text{Rad}(424) = \text{Rad}(2^3 \cdot 53) = 2 \cdot 53 = 106;$$

$$\text{Rad}(437) = \text{Rad}(23 \cdot 19) = 23 \cdot 19 = 437.$$

Le radical d'un nombre est toujours inférieur ou égal à ce nombre. Les nombres premiers et ceux qui contiennent une seule fois chacun de leurs facteurs premiers sont « au seuil de pauvreté » : ils sont égaux à leur radical. À l'inverse, si chaque facteur premier de n est muni d'un exposant élevé, alors $\text{Rad}(n)$ est beaucoup plus petit que n .

Pour quantifier la richesse d'un nombre, on lui associe sa « puissance moyenne » $\delta(n)$,

définie par l'égalité $n = [\text{Rad}(n)]^{\delta(n)}$. En passant au logarithme, on obtient une définition explicite :

$$\delta(n) = \frac{\log(n)}{\log(\text{Rad}(n))}$$

Pour les exemples précédents, on a : $\delta(324) = \log(324)/\log(6) = 3,22629\dots$; $\delta(424) = \log(424)/\log(106) = 1,29726\dots$, et évidemment $\delta(437) = \log(437)/\log(437) = 1$.

Un petit programme suffit à calculer rapidement la valeur moyenne δ^* de δ pour un ensemble de nombres. En tirant plusieurs fois au hasard 10 000 entiers entre un et un milliard, nous avons obtenu successivement les moyennes $\delta^* = 1,047519\dots$, puis $\delta^* = 1,05267\dots$, et $\delta^* = 1,04793\dots$. Un tirage de 100 000 nombres au hasard sans limite de taille a donné $\delta^* = 1,049266\dots$. Cela suggère qu'un nombre « moyen » ne vit que légèrement au-dessus du seuil de pauvreté. En règle générale, on s'attend à ce que la puissance moyenne ne dépasse pas 1,06.

Cette valeur moyenne suffit-elle à capturer la diversité des nombres entiers ? Évidemment, non. Il existe des cas isolés qui sont loin de toute valeur moyenne. Par exemple, dans l'intervalle allant de un à un milliard, on trouve le nombre richissime $67\,108\,864 = 2^{26}$, qui a une puissance moyenne $\delta = 26$. Et la richesse n'est pas bornée, puisqu'il existe des puissances de 2 avec un exposant aussi grand que l'on veut.

Cherchons le nombre le plus riche parmi 10 000 choisis au hasard dans l'intervalle précédent. Un premier essai donne $n = 692\,599\,663$, avec $\delta(n) = 3,831201\dots$. Sa décomposition en facteurs premiers est $n = 7^7 \cdot 29^2$. Une deuxième tentative donne $n = 614\,810\,677 = 13^3 \cdot 23^4$, avec $\delta(n) = 3,55004\dots$. Les nombres riches sont en général des nombres puissants. Par définition, la puissance moyenne des nombres puissants vaut au moins deux, donc la valeur maximale de δ pour un grand échantillon de nombres ne peut pas être inférieure à 2. En général, elle est nettement supérieure, comme le montrent les exemples.

Nos expériences numériques montrent en outre que les nombres puissants sont plus fréquents que les puissances pures (du type 2^{26}), ce que confirment des arguments – difficiles – de la théorie des nombres. Plus fréquents encore sont les nombres « presque puissants », c'est-à-dire puissants à un facteur près, petit par rapport à ce nombre (par exemple, 5 000 000 est presque puissant, car 5 est petit devant 1 000 000, très puissant). Eux aussi ont une

puissance moyenne δ qui est bien au-dessus de la moyenne des entiers.

Résumons les conclusions de ces expériences numériques. Le nombre moyen est pauvre : $\delta(n) \leq 1,06$. Les nombres riches, avec $\delta \geq 2$, sont rares, bien plus encore que les nombres premiers, mais ils sont plus fréquents que les puissances pures et leur richesse est en principe illimitée.

On ne peut pas dire grand-chose d'intéressant de plus sur la richesse d'un seul nombre. Il est peu probable que deux nombres choisis au hasard soient tous les deux riches. Mais, en reprenant l'idée évoquée précédemment de combiner les structures multiplicative et additive, posons-nous la question suivante : la somme de deux nombres assez riches est-elle riche elle aussi ?

Mesurer la puissance moyenne d'un triplet

Choisissons deux entiers A et B avec la seule restriction qu'ils soient premiers entre eux (sans facteurs premiers en commun). En posant $C = A + B$, on s'attend en fait à ce qu'au moins un des nombres A , B ou C se comporte comme un nombre moyen.

Si A est un nombre moyen, on s'attend à ce que $A \leq \text{Rad}(A)^{1,06}$ ou, de façon équivalente, $\log(\text{Rad}(A)) \geq \log(A)/1,06$. Si c'est vrai pour A , B et C , alors $\log(\text{Rad}(A \cdot B \cdot C)) = \log(\text{Rad}(A)) + \log(\text{Rad}(B)) + \log(\text{Rad}(C)) \geq [\log(A) + \log(B) + \log(C)]/1,06$ (comme A , B et donc C sont premiers entre eux, on a $\text{Rad}(A \cdot B \cdot C) = \text{Rad}(A) \cdot \text{Rad}(B) \cdot \text{Rad}(C)$).

Or pour des nombres entiers positifs, on a $A + B \leq A \cdot B + 1$, ce qui entraîne que $\log(C) \leq \log(A) + \log(B)$. En substituant cette inégalité dans la précédente, on obtient $\log(\text{Rad}(A \cdot B \cdot C)) \geq 2 \log(C)/1,06$. Autrement dit, on s'attend à ce que, en moyenne, $C \leq \text{Rad}(A \cdot B \cdot C)^{0,53}$, ce qui peut être approximé par $\sqrt{\text{Rad}(A \cdot B \cdot C)}$.

Par analogie avec la puissance moyenne, qui quantifie la richesse d'un nombre, on introduit une mesure de la « richesse » d'un triplet : pour des entiers naturels A , B , C premiers entre eux qui vérifient $A + B = C$, on pose :

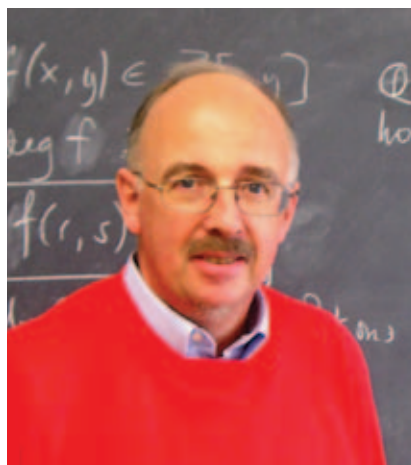
$$\kappa(A, B, C) = \frac{\log(C)}{\log(\text{Rad}(A \cdot B \cdot C))}$$

$\kappa(A, B, C)$ est la puissance à laquelle il faut élever le radical de ABC pour retrouver C : $C = [\text{Rad}(A \cdot B \cdot C)]^{\kappa(A, B, C)}$.

Nous avons évalué cette mesure par des expériences numériques. En choisissant au

hasard 10 000 triplets $(A, B, A + B = C)$ entre 1 et 10 milliards, nous avons obtenu une valeur moyenne $\kappa^*(A, B, C) = 0,3848 \dots$. C'est largement en dessous de la valeur 0,53 conjecturée précédemment. En fait, l'approximation de $A + B$ par AB est très grossière.

La valeur moyenne de $\kappa(A, B, C)$ ne livre cependant pas beaucoup d'informations. Déterminer une borne supérieure serait plus intéressant. Mais existe-t-elle ?



3. LA CONJECTURE ABC A ÉTÉ ÉNONCÉE en 1985 par David Masser, de l'Université de Bâle, en Suisse (en haut), et Joseph Oesterlé, de l'Université de Paris VI (en bas).

Commençons par essayer de construire des triplets A, B, C pour lesquels $\kappa(A, B, C)$ est assez grand. Pour cela, il est utile de prendre un nombre C riche, par exemple l'entier $614\,810\,677 = 13^3 \cdot 23^4$ utilisé précédemment, et de l'écrire comme une somme de deux entiers A et B premiers entre eux. En choisissant 10 000 couples (A, B) au hasard qui vérifient ces conditions, nous avons obtenu $\kappa^*(A, B, C) = 0,70195$. C'est déjà bien plus que la valeur conjecturée 0,53, et ce pour un choix aléatoire.

En outre, il existe des triplets particuliers pour lesquels κ est encore plus grand. Par exemple, $\kappa(1\,365, 614\,797\,312, 614\,810\,677)$ est égal à 0,864135... Comment expliquer cela ? Les nombres $A = 13\,365 = 3^5 \cdot 5 \cdot 11$ et $B = 614\,797\,312 = 150\,097 \cdot 2^{12}$ sont assez riches, et $C = 13^3 \cdot 23^4$ l'est davantage. De plus, A est petit par rapport à C , ce qui en général signifie qu'il a peu de chances de contribuer au radical. Il est remarquable que notre exploration aléatoire ait trouvé cette solution.

À partir d'un tel triplet de nombres presque puissants, on peut construire une équation pour laquelle des facteurs du triplet sont une solution. Pour l'exemple précédent, on peut construire l'équation $55x^5 + 150\,097y^{12} = 23z^3$, qui a pour solution $x = 3$, $y = 2$ et $z = 299 = 13 \cdot 23$.

On peut généraliser cet exemple trouvé par hasard : on se donne une équation de trois variables, on cherche autant de solutions que possible et l'on construit à partir de celles-ci des triplets de nombres riches. Voici deux types d'équations intéressantes.

D'après un résultat élémentaire de la théorie des nombres, l'équation $x^2 = 3y^2 + 1$ admet un nombre infini de solutions. Le couple $(3\,650\,401, 2\,107\,560)$ en est une. Si on pose $A = 1$, $B = 3y^2$ et $C = x^2$, on obtient

$$\kappa(A, B, C) = \frac{\log(C)}{\log(\text{Rad}(A \cdot B \cdot C))} = \frac{2 \log(x)}{\log(\text{Rad}(x \cdot 3y))}$$

Comme x et $3y$ sont premiers entre eux (sinon, un diviseur diviserait $x^2 - 3y^2 = 1$), on a $\text{Rad}(x \cdot 3y) = \text{Rad}(x) \text{Rad}(3y)$. En outre, $\log(3y)$ et $\log(x)$ sont presque égaux pour x et y assez grands ; par conséquent, si l'on suppose que ceux-ci sont des nombres « moyens » dont la puissance moyenne δ vaut 1,06, on déduit que $\kappa(A, B, C) \approx 1,06$, soit $\kappa(A, B, C) \geq 1$. Pour les nombres cités en exemple, on trouve $\kappa(1, 13\,325\,427\,460\,800, 13\,325\,427\,460\,801) = 1,06843$. C'est en effet supérieur à 1, mais pas de beaucoup.

Le deuxième type d'équations donne des puissances κ encore plus grandes : il s'agit de $ax^3 + by^3 = cz^3$, où les coefficients a, b et c sont des entiers relatifs. Si une solution (x, y, z) comporte des termes négatifs, on peut toujours modifier l'équation pour n'avoir que des termes positifs. Si tous les monômes de l'équation sont positifs, on pose $A = ax^3$, $B = by^3$ et $C = cz^3$.

On connaît assez bien l'ensemble des solutions de ce type d'équations : elles appartiennent aux courbes elliptiques, des objets très étudiés en théorie des nombres et en géométrie algébrique. Parfois, ce type

Croissance polynomiale ou exponentielle

La croissance d'une fonction $f(x)$ quand x tend vers l'infini peut être similaire (entre autres) à celle d'un polynôme x^n ou à celle d'une exponentielle a^x (a fixé). Peu importe le comportement de $f(x)$ dans un intervalle fini, la croissance exponentielle devient tôt ou tard plus rapide que la croissance polynomiale.

Cette distinction est essentielle pour les calculs numériques. Un problème où le temps de calcul nécessaire croît de façon polynomiale en fonction de la variable étudiée (ou problème P) est considéré comme « facile » : il peut être résolu en un temps raisonnable. Si, en revanche, le nombre d'opérations

croît exponentiellement avec la variable considérée (problème NP, pour *non polynomial*), le problème est considéré comme difficile et dépasse vite les capacités de calcul existantes. Une des sept « questions du millénaire » est de savoir si les problèmes NP peuvent se ramener à des problèmes P.

tats empiriques, on serait tenté de choisir $\alpha = 1,4$. Malheureusement, dans certains cas, $\kappa(A, B, C)$ est supérieur à 1,4. Par ailleurs, dans la plupart des cas, $\kappa(A, B, C)$ est beaucoup plus petit. Cette borne est à la fois trop grande et trop petite.

Pour contourner ce problème, on introduit une deuxième constante. À la place de l'équation précédente, on pose :

$$A + B \leq d [\text{Rad}(A \cdot B \cdot (A + B))]^\alpha$$

où d est une constante qui devrait être effective. En exprimant cette inégalité en fonction de κ , on obtient l'inégalité suivante :

$$\kappa(A, B, C) \leq \alpha + \frac{\log d}{\log(\text{Rad}(A \cdot B \cdot C))}$$

d'équation n'a aucune solution parmi les entiers naturels non nuls (par exemple, $x^3 + y^3 = z^3$ n'a pas de solutions, d'après le théorème de Fermat), parfois elles en ont une infinité.

Si les nombres x, y, z sont à peu près du même ordre de grandeur et sont très supérieurs aux coefficients a, b et c , alors on obtient, par une estimation analogue à la précédente, que $\kappa(A, B, C) \approx \delta(x)$ et que cette valeur est probablement inférieure à 1,06. Si, en revanche, x est beaucoup plus petit (de plusieurs ordres de grandeur) que y et z , on obtient $\kappa(A, B, C) \approx 3/2 \delta(x)$.

Le triplet $(51^3, 5 \cdot 49^3, 22 \cdot 32^3)$ donne par exemple $\kappa(A, B, C) = 1,27509\dots$, le triplet $(1, 17 \cdot 7^3, 18^3)$ donne $\kappa = 1,31962\dots$, et le triplet $(1, 5 \cdot 2^4, 3 \cdot 3^3)$ donne $\kappa = 1,29\dots$

Le dernier exemple est particulièrement intéressant, car $81 = 3^4 = 5 \cdot 2^4 + 1$ est une solution de l'équation $x^4 = 5y^4 + z^k$, où k est un entier aussi grand que l'on veut. Plus les exposants dans l'équation sont élevés (2 et 3 dans les exemples précédents), plus la valeur de $\kappa(A, B, C)$ que l'on peut obtenir est grande – si tant est que l'équation en question admette encore des solutions. Or il n'y en a pas beaucoup. Gerd Faltings, lauréat de la médaille Fields en 1986 pour sa démonstration de la conjecture de Mordell, a montré par celle-ci que l'équation $x^4 = 5y^4 + z^k$ n'a, pour chaque exposant $k \geq 4$, qu'un nombre fini de solutions dont les termes sont premiers entre eux. On pense même que l'ensemble des solutions pour tous k confondus est fini, c'est-à-dire que l'ensemble des triplets (x, y, z) premiers entre eux et pour lesquels il existe un entier $k \geq 4$ tel que $x^4 = 5y^4 + z^k$ est fini.

Résumons. Nos expériences numériques suggèrent qu'en moyenne, la puissance moyenne $\kappa(A, B, C)$ d'un triplet est d'environ 0,5 ; dans tous les cas étudiés, κ est inférieur à 2 ; pour de nombreux exemples,

κ est supérieur à 1, et ces valeurs élevées sont intimement liées à des solutions d'équations polynomiales à trois variables.

La version forte de la conjecture ABC

Tous ces résultats expérimentaux permettent enfin de proposer – avec toute la prudence requise vis-à-vis de résultats empiriques – la conjecture suivante : la puissance moyenne $\kappa(A, B, C)$ des triplets (A, B, C) , où A, B et C sont premiers entre eux et tels que $A + B = C$, est bornée, c'est-à-dire qu'il existe un nombre positif α tel que $\kappa(A, B, C) \leq \alpha$.

On peut exprimer la même chose sans faire référence aux quantités C et κ , qui dépendent de A et de B . Un peu de travail donne :

$$A + B \leq [\text{Rad}(A \cdot B \cdot (A + B))]^\alpha$$

Plutôt que d'affirmer l'existence d'une telle borne α , on aurait préféré qu'elle soit calculable. Des algorithmes qui peuvent en principe déterminer cette valeur ont

TAILLER LE COSTUME IDÉAL
pour les entiers signifie couvrir tous les cas, mais avec une approximation aussi proche du corps que possible.

été mis au point ; mais en pratique, le temps de calcul prendrait des siècles, voire plus. On cherche toujours un algorithme effectif, c'est-à-dire qui pourrait livrer un résultat en un temps raisonnable, par exemple une semaine de calcul sur un ordinateur personnel.

Même si l'on parvenait à démontrer la conjecture pour une très grande valeur de α , cela ne servirait pas à grand-chose : une approximation trop grossière ne dit plus grand-chose sur le comportement des triplets. La borne α doit être aussi petite que possible. D'après nos résul-

À première vue, la conjecture initiale est si déformée qu'elle semble vidée de sa substance. Si un contre-exemple ne vérifie pas l'inégalité, on n'a qu'à choisir une valeur de d plus grande pour que l'inégalité soit satisfaite. Supposons que l'on ait cherché un contre-exemple parmi tous les nombres inférieurs à un milliard ; il suffit de prendre d supérieur au plus grand des nombres C testés, soit un milliard, pour que la conjecture soit vérifiée pour tout α , ce qui n'a aucun intérêt.

Mais cette première impression est trompeuse. On a montré que plus A, B et C sont grands, plus $\log(\text{Rad}(A \cdot B \cdot C))$ devient grand, bien que plus lentement. Ainsi, le degré de liberté que nous offre la constante d devient négligeable lorsque les nombres considérés deviennent grands. Pour les nombres « très grands », seule la borne α compte.

Cependant, cette formulation contient encore trop de choix. Pour faire rentrer un contre-exemple dans le rang, on a le choix d'augmenter α ou d . Le but est pourtant de tailler, par un choix approprié de α et d , un « costume idéal » pour tous les entiers naturels : il devrait tout couvrir (aucun contre-exemple) et en même temps être aussi proche du corps que possible (l'approximation ne doit pas être trop large). Cela signifie que pour au moins quelques triplets, l'inégalité ci-dessus devrait être une égalité. En prenant α et d légèrement plus petits que ces valeurs bien ajustées, on pourrait trouver un contre-exemple. Diminuer α demanderait d'agrandir d et inversement.

La conjecture ABC dans la version énoncée par J. Oesterlé et D. Masser est encore plus forte que notre dernière version. Elle dit qu'il suffit de prendre α supérieur à 1, mais aussi proche de 1

que l'on veut. Tous les cas particuliers peuvent alors être englobés en choisissant une valeur appropriée de d . Il faut juste accepter que d devienne arbitrairement grand si α s'approche de 1. En termes précis, la conjecture ABC s'énonce ainsi :

Pour tout nombre réel $\varepsilon > 0$, il existe un nombre réel $d_\varepsilon > 0$ tel que, pour tous entiers naturels A , B et C premiers entre eux et tels que $A + B = C$, on ait :

$$C \leq d_\varepsilon [\text{Rad}(A \cdot B \cdot C)]^{1+\varepsilon}$$

Autrement dit, en prenant le logarithme :

$$\kappa(A, B, C) \leq 1 + \varepsilon + \frac{\log(d_\varepsilon)}{\log(\text{Rad}(A \cdot B \cdot C))}$$

où le terme d'erreur $\log(d_\varepsilon)$ dépend de ε .

Pourquoi ne pas choisir α égal à 1, voire moins ? Parce que l'on connaît certains contre-exemples (notamment de la forme $(A, B, C) = (1, 2^{p(p-1)} - 1, 2^{p(p-1)})$, où p est un nombre impair tel que $2^{p(p-1)} - 1$ est divisible par p^2). Par ailleurs, peut-on trouver un ε pour lequel on peut prendre $d_\varepsilon = 1$, ce qui correspond à notre première version de la conjecture ? Bien sûr, on cherche $\alpha = 1 + \varepsilon$ qui soit le plus petit possible.

La plus grande valeur connue pour $\kappa(A, B, C)$ est 1,6299117. Elle correspond au triplet $(2, 3^{10} \cdot 109, 23^5)$, solution de l'équation $x^5 - 109y^{10} = 2$, trouvée par Éric Reyssat, aujourd'hui à l'Université de Caen. Ayant testé tous les nombres jusqu'à 10^{20} , nous savons qu'au moins dans cet intervalle immense, il n'existe pas de contre-exemple (pour $d_\varepsilon = 1$) à la conjecture ABC avec $\alpha = 2$ (qui correspond à $\varepsilon = 1$), c'est-à-dire $\kappa(A, B, C) \leq 2$.

À la recherche des bons triplets

Depuis que la conjecture ABC a été énoncée, elle a suscité une recherche intense de triplets nécessitant de grandes constantes α et d , c'est-à-dire pour lesquels $\kappa(A, B, C)$ est grand. Ces exemples resserrent l'intervalle pour le choix de ε et d_ε , mais il y a aussi une part de compétition dans cette recherche des triplets les plus riches. C'est à qui mettra au point l'algorithme le plus rapide et le plus performant. On peut en outre espérer découvrir des équations intéressantes.

On dit que (A, B, C) est un « bon triplet » si $\kappa(A, B, C) > 1,4$. Ces triplets sont extrêmement rares. Dans la tranche des entiers allant jusqu'à 10^{20} , presque entièrement explorée, il n'y en a qu'environ 200.

Sur le modèle des projets participatifs de recherche de signaux extraterrestres

ou d'étude du repliement des protéines, le projet ABC@home invite tous les internautes à participer à la recherche d'autres bons triplets en donnant un peu de temps de calcul de leur ordinateur, ou même en développant leur propre algorithme.

Outre son intérêt intrinsèque, la démonstration de la conjecture ABC entraînerait celle de nombreux problèmes de la théorie des nombres. C'est le cas notamment du redoutable théorème de Fermat, dont la conjecture ABC apporte une preuve – du moins pour n assez grand – d'une simplicité dérisoire.

Dans l'équation $x^n + y^n = z^n$, posons $A = x^n$, $B = y^n$, $C = z^n$. On donne d'abord une borne supérieure grossière pour $\text{Rad}(ABC)$:

$$\begin{aligned} \text{Rad}(ABC) &= \text{Rad}(x^n y^n z^n) \\ &= \text{Rad}(xyz) \leq xyz < z^3. \end{aligned}$$

Cela donne une borne inférieure pour $\kappa(A, B, C)$: $\kappa(A, B, C) = \log(C) / \log(\text{Rad}(ABC)) \geq \log(z^n) / \log(z^3) = n/3$.

Cette dernière quantité tend vers l'infini pour des exposants n élevés. Si par exemple $\kappa(A, B, C)$ était borné par 2, on aurait ainsi démontré que l'équation de Fermat n'a pas de solutions pour $n \geq 6$. Le théorème de Fermat étant prouvé depuis longtemps pour des petits exposants, cela suffirait pour boucler sa démonstration.

La validité de la conjecture ABC apporterait des démonstrations faciles et élégantes à d'autres poids lourds de la théorie des

L'AUTEUR



Gerhard FREY est professeur à l'Institut de mathématiques expérimentales de l'Université

Duisburg-Essen, en Allemagne.

Le logarithme

Le logarithme (décimal) d'un nombre strictement positif X est le nombre $\log X$ tel que $X = 10^{\log X}$. La fonction logarithme transforme un produit en somme :

$$\log(ab) = \log(a) + \log(b),$$

$$\text{et } \log(a^n) = n \log(a).$$

Par ailleurs, $\log 1 = 0$.

On peut choisir une autre base que la base 10. Pour la base $e = 2,718...$, le logarithme est dit népérien et est noté $\ln$.

	$\kappa > 1$	$\kappa > 1,05$	$\kappa > 1,1$	$\kappa > 1,2$	$\kappa > 1,3$	$\kappa > 1,4$
$C < 10^2$	6	4	4	2	0	0
$C < 10^3$	31	17	14	8	3	1
$C < 10^4$	120	74	50	22	8	3
$C < 10^5$	418	240	152	51	13	6
$C < 10^6$	1 268	667	379	102	29	11
$C < 10^7$	3 499	669	856	210	60	17
$C < 10^8$	8 987	3 869	1 801	384	98	25
$C < 10^9$	22 316	8 742	3 693	706	144	34
$C < 10^{10}$	51 677	18 233	7 035	1 159	218	51
$C < 10^{11}$	116 978	37 612	13 266	1 947	327	64
$C < 10^{12}$	252 856	73 714	23 773	3 028	455	74
$C < 10^{13}$	528 275	139 762	41 438	4 519	599	84
$C < 10^{14}$	1 075 319	258 168	70 047	6 665	769	98
$C < 10^{15}$	2 131 671	463 446	115 041	9 497	998	112
$C < 10^{16}$	4 119 410	812 499	184 727	13 118	1 232	126
$C < 10^{17}$	7 801 334	1 396 909	290 965	17 890	1 530	143
$C < 10^{18}$	14 482 065	2 352 105	449 194	24 013	1 843	160

4. LA LISTE DES « BONS » TRIPLETS. Ce tableau présente le nombre de valeurs de C dans certains intervalles (lignes) pour lesquelles il existe A et B premiers entre eux, avec $A + B = C$, tels que la richesse $\kappa(A, B, C)$ soit supérieure à une borne donnée (colonnes).

nombres. Il s'agit en général de problèmes diophantiens, du nom du mathématicien du III^e siècle Diophante d'Alexandrie. Ces problèmes font intervenir des équations polynomiales à coefficients entiers, dont on cherche les solutions parmi les nombres entiers (on parle d'équations diophantiennes). Une démonstration de la conjecture ABC fournirait en particulier une solution simple aux problèmes suivants :

- La conjecture de Catalan, selon laquelle l'équation $x^m - y^n = 1$ n'a qu'une seule solution parmi les entiers naturels : $3^2 - 2^3 = 1$. Elle a été démontrée en 2002 par le mathématicien roumain Preda Mihăilescu.

- La conjecture de Mordell, démontrée en 1983 par Gerd Faltings, affirme que chaque courbe dont le « genre » est plus grand que 1, définie par une équation polynomiale à coefficients rationnels, ne peut contenir qu'un nombre fini de points dont les coordonnées sont rationnelles (le genre peut être vu comme le nombre de fois où il est possible de couper la courbe sans obtenir deux morceaux séparés). Noam Elkies, de l'Université Harvard, a démontré en 1991 que la conjecture de Mordell est une conséquence de la conjecture ABC. Si la conjecture ABC était valable dans sa version la plus forte, cela prouverait non seulement l'existence de ces points rationnels, mais donnerait aussi un procédé effectif pour les déterminer.

- Un grand nombre de généralisations de ces problèmes. La preuve de la conjecture ABC entraînerait par exemple celle que chaque égalité (dite de Fermat) $ax^n + by^n = cz^n$ pour $n \geq 4$ (et a, b, c entiers relatifs) n'a qu'un nombre fini de solutions. Il en est de même pour l'équation de Catalan-Fermat $x^n + y^m = z^k$, si les exposants sont « grands », c'est-à-dire si $1/n + 1/m + 1/k < 1$.

Il reste qu'à ce jour, la conjecture ABC n'est pas démontrée – du moins tant que les affirmations de S. Mochizuki n'ont pas été vérifiées. Pourquoi serait-elle vraie ? Et quels sont les résultats intermédiaires atteints à ce stade ?

Comme on l'a vu, de nombreuses données numériques soutiennent la validité de la conjecture, mais elles n'aident en rien à la prouver. En mathématiques, on cherche à obtenir des énoncés qui ne concernent pas seulement un comportement moyen, mais qui sont valables dans tous les cas. Or la difficulté de la conjecture ABC vient des nombres exceptionnels qui échappent à la statistique.

Des pistes ténues vers une démonstration

En utilisant des méthodes de ce qu'on appelle la théorie des nombres transcendants, Cameron Stewart, Robert Tijdeman et Kunrui Yu ont pu montrer que le taux de croissance de C en fonction de $\text{Rad}(ABC)$ est au plus exponentiel. D'après la conjecture ABC, cette croissance est polynomiale, avec un exposant égal au plus à 2 ou $1 + \varepsilon$, suivant la version de la conjecture. On sait donc au moins que la croissance de C n'est pas illimitée, mais cela est insuffisant pour des grandes valeurs de C . Et il semble hors de portée de gravir, avec les méthodes utilisées, la marche séparant la croissance exponentielle de la croissance polynomiale.

Une autre approche emprunte un chemin *a priori* paradoxal. En généralisant la conjecture ABC, donc en la rendant en quelque sorte plus difficile, on a l'espoir de faciliter la démonstration. La généralisation consiste à remplacer les nombres naturels usuels par des structures abstraites plus compliquées. Les propriétés des entiers

naturels utilisées dans la conjecture sont la structure additive, la structure multiplicative et l'ordre total : deux entiers peuvent toujours être comparés, au sens que l'un est forcément plus petit ou égal à l'autre. Ces trois propriétés se retrouvent dans beaucoup d'autres structures mathématiques, par exemple :

- Les nombres rationnels, c'est-à-dire les fractions de la forme r/s , où r et s sont des entiers relatifs. On utilise l'addition et la multiplication usuelles, mais au lieu de l'ordre habituel, on ordonne ici les rationnels par leur « hauteur », c'est-à-dire le maximum entre le numérateur et le dénominateur de la fraction sous forme réduite (sans tenir compte du signe). La hauteur est en quelque sorte une mesure de la complexité d'un nombre rationnel.

- Les polynômes, c'est-à-dire des sommes de produits de puissances des variables et de constantes. L'ordre est donné par le degré du polynôme, la plus élevée des sommes des exposants d'un terme du polynôme.

- Les fonctions rationnelles, c'est-à-dire les fractions dont le numérateur et le dénominateur sont des polynômes.

- Les extensions algébriques des nombres rationnels (corps de nombres algébriques) et des fonctions rationnelles (corps de fonctions algébriques).

Il est possible de transposer la conjecture ABC pour ces structures ; le contexte devient ainsi plus clair. R. Mason et W. Stothers ont prouvé l'équivalent de la conjecture ABC pour les polynômes par des méthodes élémentaires en 1981, avant que la conjecture sur les entiers n'ait été énoncée. Et dans le cadre général des corps de fonctions, la relation avec les courbes elliptiques, qui avaient déjà joué un grand rôle dans la preuve du théorème de Fermat, devient évidente.

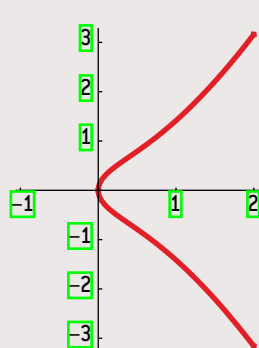
Considérons une courbe elliptique E . On peut définir trois nombres qui la caractérisent : son invariant modulaire, noté j_E , son discriminant, noté Δ_E , et sa hauteur, notée h_E (voir l'encadré ci-contre). Le comportement de la courbe E est décrit par le radical du discriminant, aussi appelé conducteur de la courbe.

Lucien Szpiro, de l'Université de New York, a conjecturé qu'il existe un nombre k tel que pour toute courbe elliptique E , $\delta(|\Delta_E|) \leq k$ (la puissance moyenne du discriminant est bornée). Il est remarquable que L. Szpiro ait observé ce comportement dans le cas des corps de fonctions, et ait formulé un analogue pour le cas des corps de nombres.

Un lien intime avec les courbes elliptiques

Une courbe elliptique E (ci-contre un exemple) est l'ensemble des points de coordonnées (x, y) solutions d'une équation de la forme $y^2 = x^3 + ax + b$, où a et b sont des entiers tels que le « discriminant » $\Delta_E = 4a^3 - 27b^2$ soit non nul (cela garantit que la courbe n'ait pas de points singuliers).

On peut définir une hauteur de Faltings h_E pour une courbe elliptique E .



Lorsque la courbe est « semi-stable », h_E est reliée à la hauteur du nombre $j_E = 12^3 \cdot 4a^3 / \Delta_E$, nommé invariant modulaire.

La « conjecture sur la hauteur des courbes elliptiques », formulée par l'auteur, énonce que la hauteur h_E est bornée par une quantité qui dépend du radical du discriminant Δ_E ($h_E \leq k \log \text{Rad}(|\Delta_E|)$). La conjecture ABC découle de celle sur les hauteurs.

L. Szpiro a prouvé cette conjecture dans le cas des corps de fonctions (pour $k = 6$), si bien que la version forte de la conjecture ABC est vraie pour ces corps (ce qui généralise le résultat de R. Mason et W. Stothers). Cela justifie l'espoir que la conjecture soit valable pour les nombres rationnels qui, du point de vue arithmétique, sont assez semblables aux fonctions rationnelles.

J'ai généralisé la conjecture de L. Szpiro en affirmant que la hauteur h_E est bornée par un multiple de $\log \text{Rad}(\Delta_E)$. J'ai ensuite prouvé que cette « conjecture sur la hauteur des courbes elliptiques » entraîne la conjecture ABC . Ces deux dernières sont même équivalentes dans le cadre des fonctions rationnelles.

En exploitant la très riche théorie des courbes elliptiques, développée depuis plus de 200 ans, notamment en utilisant des résultats qui ont conduit G. Faltings à la preuve de la conjecture de Mordell, j'ai ainsi trouvé une borne – malheureusement toujours exponentielle – de C en fonction de $\text{Rad}(ABC)$.

Mais on a fait encore mieux. Par sa relation avec l'arithmétique des courbes elliptiques, la conjecture ABC s'intègre à la géométrie algébrique. Cette branche des mathématiques, qui donne une interprétation géométrique à des problèmes de la théorie des nombres et apporte ainsi des éclaircissements surprenants, a été révolutionnée dans les années 1960 par le mathématicien Alexandre Grothendieck.

D'après moi, la conjecture sur la hauteur des courbes elliptiques n'est pas seulement un énoncé profond sur ces objets en question, mais aussi l'arrière-plan structurel recherché pour la conjecture ABC . Et pour J. Oesterlé, la motivation essentielle de la conjecture ABC était son rapport avec l'arithmétique des courbes elliptiques.

La conjecture sur la hauteur des courbes elliptiques étant vraie pour le corps des fonctions rationnelles, la conjecture ABC l'est aussi pour ce corps. Ma démonstration en est simple et courte, mais on ne peut malheureusement pas la transposer du monde géométrique vers celui des nombres. En revanche, la démonstration initiale de L. Szpiro, bien plus compliquée, fournit une ébauche d'une telle transposition.

Cette preuve tire parti de l'arithmétique des surfaces algébriques, bien étudiées en géométrie algébrique. Il existe un analogue à ces surfaces dans le monde des nombres,



5. ALEXANDRE GROTHENDIECK (ici au Vietnam en 1967) a refondé dans les années 1960 la géométrie algébrique. Né en 1928, ce fils d'un anarchiste russe a découvert très jeune des résultats révolutionnaires, malgré une formation sommaire. En 1970, notamment par conviction antimilitariste, il quitte l'Institut des hautes études scientifiques, près de Paris. Depuis 1991, il vit retiré du monde dans les Pyrénées.

appelé « surfaces arithmétiques ». Ces objets jouent un rôle clef dans la démonstration de la conjecture de Mordell, et les propriétés des surfaces arithmétiques qui permettraient de prouver la conjecture sur la hauteur des courbes elliptiques sont bien identifiées. Nous sommes cependant loin d'avoir trouvé ces propriétés...

Les travaux de S. Mochizuki ont-ils changé la donne ? Expert reconnu dans le domaine des surfaces arithmétiques, S. Mochizuki a prouvé des résultats difficiles sur la relation entre les « groupes fondamentaux au sens de Grothendieck » et les surfaces. Derrière ces termes et ces résultats se cachent encore des idées profondes de A. Grothendieck reliant la théorie de Galois à l'arithmétique. De nombreux spécialistes de la théorie des nombres se sont attelés à la vérification des travaux de S. Mochizuki, qui occupent des centaines de pages et qui utilisent des objets et méthodes mathématiques peu classiques. En attendant leur verdict, la conjecture ABC reste non démontrée.

On est au moins sûr d'une chose. La conjecture ABC n'est pas une bizarrerie gratuite de la théorie des nombres. Elle a de vastes conséquences et découle elle-même d'autres conjectures, dont il y a de bonnes raisons de penser qu'elles sont vraies. La relation entre théorie des nombres et géométrie qui sert de fondation depuis 50 ans à la géométrie algébrique serait mise à rude épreuve si la conjecture ABC était fausse. Il est difficile de l'imaginer. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. Mochizuki, *Inter-universal Teichmüller theory I : Construction of Hodge theatres*, 2012. Prépublication : www.kurims.kyoto-u.ac.jp/~mochizuki/Inter-universal/Teichmuller/Theory/I.pdf

G. Frey, *Der Beweis des Fermatschen Theorems*, *Moderne Mathematik*, pp. 166-175, Spektrum Akademischer Verlag, 1996.

G. Frey, *Links between solutions of $A - B = C$ and elliptic curves*, *Number Theory - Lecture Notes in Mathematics*, vol. 1380, pp. 31-62, Springer, 1989.

J. Oesterlé, *Nouvelles approches du théorème de Fermat*, *Séminaire Bourbaki*, exposé 694, 1987-88.

F. Beukers, *Introduction to the ABC conjecture*, conférence donnée le 9 septembre 2005 : www.math.leidenuniv.nl/~fdesmit/ic/abc/fritsABCpresentation.pdf

La liste des bons triplets : www.rekenmeemetabc.nl/?item=h_stats.

Projet de calcul collaboratif des bons triplets : www.abcthathome.com

Les LED blanches

L'éclairage

Les lampes à diodes électroluminescentes blanches sont appelées à remplacer les ampoules à incandescence. Elles offrent une bonne qualité de lumière et autorisent d'importantes économies d'énergie.

D'autres lampes à incandescence, ingénieusement combinées, sont exposées dans des salles voisines de celles de M. Edison mais aucune ne donne sa lumière douce et pure, sa clarté fixe, et n'est rattachée à aucun système d'installation véritablement pratique.

Disons-le, dans l'intérêt de la vérité, du progrès, du bien-être général, le système de M. Edison constitue une complète révolution dans l'éclairage domestique; il est appelé à remplacer dans un temps très rapproché tous les systèmes en usage.

Le Journal des débats, 1881

Lors de l'Exposition internationale d'électricité, à Paris, en 1881, Thomas Edison fit la démonstration de ses lampes à incandescence. L'extrait du *Journal des débats* ci-dessus décrit les qualités de ce système novateur qui se généralisa à l'éclairage public et domestique. Edison se lança dans le développement des ampoules électriques dès 1879. Il perfectionna le modèle de l'Anglais Joseph Swan. Les premières lampes étaient constituées d'un filament de carbone, obtenu à partir d'une fibre de bambou du Japon, et placé dans une ampoule sous vide. Après avoir

testé environ 6 000 substances végétales, le choix d'Edison se porta sur le bambou pour sa flexibilité. La durée de vie des premières lampes était de 45 heures. Puis Lewis Latimer, ingénieur de la *Edison Company*, perfectionna la fabrication des lampes pour prolonger leur temps d'utilisation.

En 1898, Carl Auer von Welsbach remplaça le filament de carbone par un filament métallique pour obtenir les lampes à incandescence modernes, dont la durée de vie atteint aujourd'hui entre 1 000 et 2 000 heures. Bien qu'omniprésentes au XX^e siècle, ces lampes ne sont plus autorisées à la vente au sein de l'Union européenne depuis septembre 2012, car leur rendement énergétique est catastrophique : seulement cinq pour cent de l'énergie électrique sont convertis en lumière visible. Ces lampes ont néanmoins l'avantage de produire une lumière blanche chaude très proche de la lumière du jour.

Quel type d'éclairage peut remplacer la lampe à incandescence et satisfaire les contraintes d'une lumière agréable, une longue durée de vie et une faible consommation ? La question est un enjeu économique important, car l'éclairage représente plus

de 10 pour cent de la consommation d'électricité en France. Dans les grandes villes, ce chiffre peut même dépasser 30 pour cent.

De nombreux systèmes d'éclairage alternatifs ont été développés au cours du XX^e siècle. Il en est ainsi des lampes à décharge, qui produisent de la lumière par excitation d'un gaz sous l'effet d'un arc électrique. Différents gaz sont utilisés, tels le néon ou le sodium. Ces derniers sont souvent utilisés dans l'éclairage public, mais donnent des lumières de mauvaise qualité, très loin du spectre solaire, dans des tons orangés pour les lampes à sodium mélangé à du néon.

Les lampes fluorescentes appartiennent à la famille des lampes à décharge, mais la paroi interne est recouverte d'un revêtement fluorescent. Le fonctionnement de ces dispositifs repose aujourd'hui sur l'excitation de vapeur de mercure contenue dans une atmosphère d'argon. Après excitation, les atomes de mercure reviennent à leur état fondamental en émettant un rayonnement ultraviolet, qui est absorbé par des matériaux fluorescents recouvrant les parois du tube, matériaux qui réémettent de la lumière à différentes longueurs d'onde pour

de demain

Nicolas Grandjean

produire de la lumière blanche. Ces lampes sont de plus en plus présentes dans nos foyers, en particulier sous la forme d'ampoules fluocompactes, grâce à l'amélioration constante de la qualité de la lumière, la réduction du délai d'allumage et la diminution du prix d'achat.

Cependant, un autre type d'éclairage est apparu récemment sur le marché : les lampes à diodes électroluminescentes (LED, pour *Light-Emitting Diode*) blanches. Ces systèmes offrent des perspectives intéressantes pour un éclairage de qualité et à faible consommation ; ils pourraient remplacer les ampoules incandescentes d'ici une dizaine d'années.

En attendant, ces dispositifs peuvent encore être améliorés pour arriver à maturité. Cela passe notamment par une augmentation du rendement lumineux, défini comme le rapport du flux lumineux émis dans le domaine visible à la consommation électrique. Les LED blanches ont un rendement lumineux déjà élevé, mais il reste inférieur aux maxima théoriques qui, en fonction de la qualité de la lumière blanche, sont d'environ 350 à 400 lumens par watt. Le rendement actuel

L'ESSENTIEL

■ **L'éclairage représente plus de dix pour cent de la consommation d'électricité en France. Le remplacement des lampes à incandescence par des lampes plus efficaces, à base de diodes électroluminescentes (LED), entraînera des économies d'énergie.**

■ **Les LED au nitrure de gallium émettent une lumière bleue, dont une fraction est convertie en jaune pour donner de la lumière blanche.**

■ **Plusieurs pistes existent pour fabriquer du nitrure de gallium moins cher et de bonne qualité.**

REUTERS/SHUTTERSTOCK.COM

est de l'ordre de 100 lumens par watt pour les LED blanches, 50 à 80 lumens par watt pour les lampes fluocompactes et environ 15 lumens par watt pour les ampoules à incandescence, qui émettent surtout dans l'infrarouge.

Le principe de fonctionnement des LED blanches est très différent de celui des lampes à incandescence et fluorescentes. Nous allons voir qu'il est fondé sur la physique des semi-conducteurs et qu'il a nécessité une cinquantaine d'années de recherches et de développements avant d'aboutir à des lampes commerciales – dont le coût devrait baisser avec l'amélioration des techniques de fabrication.

Fluorescence contre rendement

Expliquons d'abord pourquoi les lampes fluocompactes ont un rendement lumineux non optimal. La raison principale est liée au phénomène de fluorescence et à l'énergie des photons impliqués – énergie directement liée à la longueur d'onde (ou la couleur) du photon. La désexcitation des atomes de mercure produit des photons

ultraviolets de cinq électronvolts (un électronvolt est l'énergie acquise par un électron soumis à une tension de un volt). Un photon du spectre visible a une énergie plus faible, comprise entre deux (pour le rouge) et trois (pour le bleu) électronvolts. Lors de la fluorescence, la différence d'énergie entre le photon ultraviolet absorbé et le photon visible émis est convertie en chaleur sur les parois de la lampe. Pour obtenir un rendement maximal, il faudrait exciter un atome qui retournerait à son état fondamental en émettant directement un photon de longueur d'onde correspondant à la lumière visible.

Cette idée est applicable dans les semi-conducteurs. Dans un tel matériau, les électrons ne peuvent occuper que certaines gammes d'énergie, nommées bandes. Entre la « bande de valence » – la dernière bande remplie d'électrons – et la « bande de conduction », d'énergie supérieure, il existe une bande interdite correspondant à des énergies inaccessibles aux électrons. Lorsqu'un électron est excité avec une énergie suffisante, il peut passer de la bande de valence à la bande de conduction en laissant un « trou » dans la première. Lorsqu'il revient dans son état fondamental, l'électron se recombine avec un trou de la bande de valence en émettant un photon.

L'énergie de ce photon correspond à la différence d'énergie entre les deux bandes autorisées – la hauteur de la bande interdite. Certains semi-conducteurs présentent des configurations permettant l'émission de photons de longueur d'onde appartenant au domaine visible (voir l'encadré page 35).

■ **LA LUMIÈRE BLANCHE** est le résultat de l'addition des différentes couleurs du spectre électromagnétique visible (380 à 780 nanomètres de longueur d'onde). Il est possible d'obtenir de la lumière blanche en additionnant seulement deux couleurs, telles le bleu et le jaune.

■ **LE LUMEN** est l'unité de flux lumineux. Cette grandeur tient compte de la sensibilité spécifique de l'œil humain aux différentes longueurs d'onde de la lumière visible. Le rendement lumineux d'une lampe, exprimé en lumens par watt, est le rapport du flux lumineux à la puissance électrique.

■ **LA TEMPÉRATURE DE COULEUR** caractérise la lumière blanche qui peut être « chaude » ou « froide » selon que sa composante jaune ou bleue domine.

■ **L'INDICE DE RENDU DES COULEURS** caractérise la qualité d'une lumière blanche et la fidélité du rendu des couleurs perçues. La valeur maximale est de 100 pour la lumière du Soleil.

Lorsque la source d'excitation de l'électron est un courant électrique, on parle de phénomène d'électroluminescence. Cet effet a été observé pour la première fois en 1907 par le physicien anglais Henry Joseph Round. Ce processus est aujourd'hui largement mis à profit dans les diodes électroluminescentes et les lasers à semi-conducteurs. La première LED émettant dans le spectre visible – une LED rouge à base d'arséniure de gallium – fut réalisée par Nick Holonyak en 1962.

LED bleues pour lumière blanche

Durant la décennie suivante, les chercheurs ont développé de nouveaux matériaux semi-conducteurs et le domaine d'émission des LED a été étendu au bleu, avec le carbure de silicium, et au jaune-vert, avec le phosphore de gallium. Mais à l'exception des LED rouges, dont la forte luminosité a permis de les utiliser dans les feux « stop » des véhicules, les LED bleues et vertes sont restées peu efficaces jusqu'au début des années 1990. Leurs applications se sont donc limitées surtout aux témoins lumineux et à l'affichage.

En 1993, Shuji Nakamura, alors ingénieur de l'entreprise japonaise *Nichia*, annonça la mise au point de la première LED bleue à forte luminosité, constituée de nitrure de gallium (GaN). Son rayonnement était dix fois plus intense que celui des autres LED bleues existantes. Cette étape était cruciale pour le développement des LED blanches : en ajoutant un matériau fluorescent qui absorbe une fraction de la lumière

LAMPE À INCANDESCENCE



Rendement (en lumens/watt)
12-20

Indice de rendu des couleurs
100

Durée de vie (en heures)
1 000-2 000

TUBE FLUORESCENT



Rendement (en lumens/watt)
70-120

Indice de rendu des couleurs
40-90

Durée de vie (en heures)
6 000-15 000

LAMPE FLUOCOMPACTE



Rendement (en lumens/watt)
50-80

Indice de rendu des couleurs
85-90

Durée de vie (en heures)
6 000-15 000

LAMPE À LED BLANCHE



Rendement (en lumens/watt)
70-100

Indice de rendu des couleurs
80-85

Durée de vie (en heures)
25 000-50 000

1. DIFFÉRENTS SYSTÈMES D'ÉCLAIRAGE ont été développés ces 130 dernières années. Si la lampe à incandescence s'est imposée grâce à la qualité de sa lumière et au faible coût de fabrication d'une

ampoule, son rendement est très faible : une grande partie de l'énergie est dissipée sous forme de chaleur. Les lampes à LED présentent un rendement élevé, qui peut encore être amélioré.

Semi-conducteurs et jonction $p-n$

Dans un matériau cristallin, les électrons susceptibles de conduire le courant occupent des niveaux d'énergie inclus dans deux bandes d'énergie (la bande de valence et la bande de conduction) séparées par une bande interdite ou *gap*. Dans un semi-conducteur, aucun électron n'est dans la bande de conduction à température ambiante, car l'énergie thermique est négligeable par rapport à l'énergie du *gap*. La bande de valence est complètement remplie, les électrons ne peuvent se mouvoir, à l'image d'une foule compacte. Le matériau est un isolant. Sous l'effet d'une excitation extérieure, un électron peut passer dans la bande de conduction, laissant un trou dans la bande de valence. L'électron et le trou sont alors mobiles dans le matériau. Quand l'électron revient dans la bande de valence, l'énergie qu'il perd est émise sous la forme d'un photon (a).

On peut contrôler la conductivité électrique en incorporant des atomes étrangers dans le matériau – on parle de dopage –, ce qui crée un niveau d'énergie dans la bande interdite. Un niveau d'énergie à proximité de la bande de valence peut alors piéger un élec-

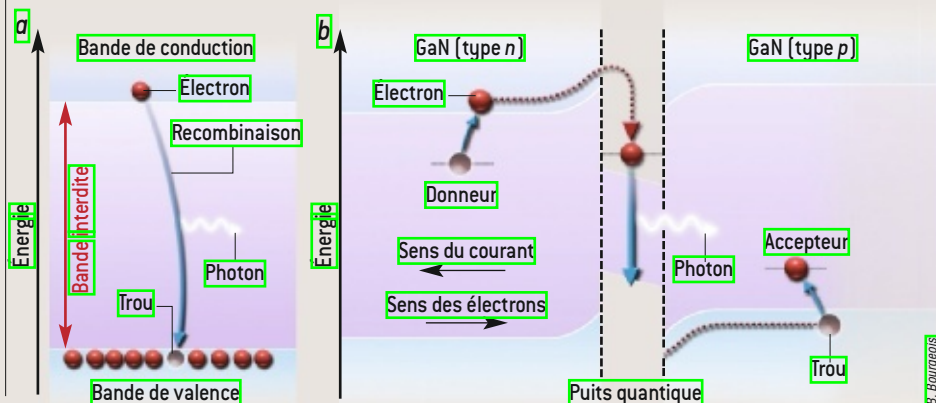
tron de cette bande – on parle d'accepteur (b). Ce « dopage de type p » libère des trous dans la bande de valence, qui peuvent circuler sous l'effet d'un champ électrique. Inversement, on peut ajouter des atomes riches en électrons, des donneurs, avec un niveau d'énergie proche de la bande de conduction. Les électrons passent alors aisément dans la bande de conduction et participent au courant. C'est le dopage de type n .

Lorsqu'on met en contact un matériau dopé n et un matériau dopé p , les porteurs de charge (les trous côté p et les électrons côté n) proches de la jonction diffusent dans le matériau voisin. Par exemple, les trous du matériau dopé p migrent dans le

matériau dopé n , puis se combinent avec les électrons de cet élément. À la jonction, il se forme une zone pauvre en porteurs de charge. La perte d'électrons du matériau dopé n crée une charge électrique positive et, symétriquement, on obtient une charge négative dans le matériau dopé p . Cette différence de charges crée, dans la jonction $p-n$, un champ électrique, qui est à l'origine de l'effet « diode » : si une tension externe est appliquée et s'oppose au champ électrique interne, l'équilibre dans la distribution des charges est rompu et un courant s'établit. Le processus de recombinaison entre électrons et trous est alors important.

Dans le nitrure de gallium, le processus de recombinaison est

principalement radiatif, avec l'émission d'un photon. Dans les LED modernes, on favorise les recombinaisons radiatives en confinant spatialement les porteurs à proximité de la jonction. Pour ce faire, on insère une couche d'un matériau de la même famille, mais ayant une bande interdite plus étroite ; on parle de puits quantique (b). Pour le nitrure de gallium, il s'agit d'une couche de 2 à 3 nanomètres contenant 15 pour cent d'indium, de façon que le *gap* corresponde à un photon bleu. Ce puits quantique, en confinant les porteurs de charge sur des niveaux d'énergie discrets – par opposition aux bandes –, favorise la recombinaison.



bleue et réémet du jaune, il était désormais possible d'obtenir de la lumière blanche, par addition du bleu et du jaune.

Le cœur des LED blanches à haute efficacité est donc constitué de semi-conducteurs inorganiques, composés de nitrures de gallium, d'aluminium ou d'indium. Ces matériaux étaient connus depuis longtemps pour leur capacité à émettre de la lumière aux courtes longueurs d'onde et avaient fait l'objet de nombreuses études à la fin des années 1960. Afin de forcer les recombinaisons électron-trou, donc l'émission de photons, on met en contact deux semi-conducteurs « dopés » avec des impuretés différentes, de façon à augmenter le nombre de trous dans la bande de valence (dopage p) et le nombre d'électrons dans la bande de conduction (dopage n). On forme ainsi une jonction $p-n$ (voir l'encadré ci-dessus).

Les chercheurs étudiant le nitrure de gallium étaient, à l'époque, confrontés à

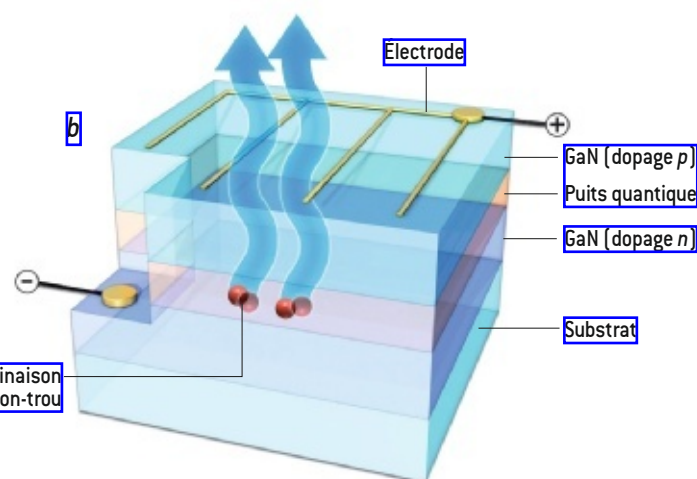
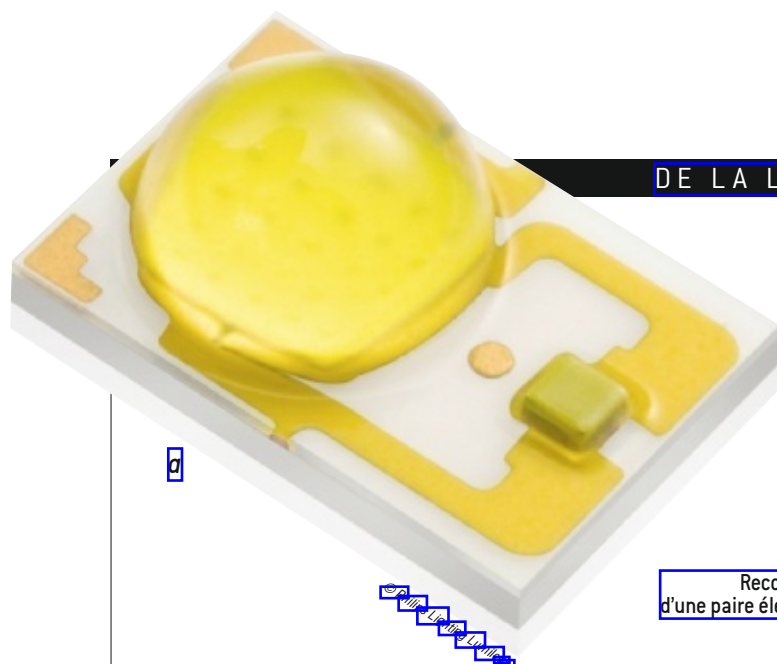
deux difficultés majeures : il était difficile de fabriquer des cristaux de bonne qualité, et le dopage de type p n'était pas maîtrisé. Seules quelques équipes japonaises ont poursuivi leurs travaux sur le nitrure de gallium. En 1989, l'équipe d'Isamu Akasaki, de l'Université de Nagoya, élaborait une technique pour doper le nitrure de gallium. Cette avancée permit la fabrication de jonctions $p-n$ et le développement de la LED de S. Nakamura, qui inventa par la suite le premier laser bleu, aujourd'hui au cœur des lecteurs DVD *Blu-ray*.

Du nitrure de gallium

Le désintérêt des chercheurs pour le nitrure de gallium pendant plus de 20 ans, entre 1970 et 1990, tient pour une bonne part à la piètre qualité des matériaux synthétisés. Le nitrure de gallium est difficile à produire sous forme d'un cristal massif, qui est ensuite découpé en éléments indi-

viduels (sur le même principe que les galettes de silicium de l'industrie électronique). Cela tient aux conditions extrêmes de température et de pression requises pour sa croissance (près de 2000 °C et 2 kilobars). Le nitrure de gallium existe donc presque exclusivement en couches minces, de quelques micromètres d'épaisseur, déposées sur des cristaux de nature différente tels que le saphir.

Cependant, faire croître du nitrure de gallium sur du saphir n'est pas aisé, leurs natures chimiques et leurs structures cristallines étant très différentes. Comme l'espacement entre les atomes du substrat et ceux du nitrure de gallium est différent, des défauts nommés dislocations se forment dans le semi-conducteur pour raccorder les mailles cristallines à l'interface. On dénombre près d'un milliard de dislocations par centimètre carré, densité si élevée que l'émission de lumière par le semi-conducteur n'est, en principe, plus



Le cœur d'une LED blanche (a) est constitué d'une LED bleue. Celle-ci (b) se compose généralement d'un substrat en saphir sur lequel sont déposées des couches de nitrure de gallium de quelques micromètres d'épaisseur. Des atomes de silicium sont incorporés dans la première couche de nitrure de gallium pour obtenir un dopage de type *n*. La couche supérieure a un dopage de type *p* grâce à l'insertion d'atomes de magnésium. Entre ces deux couches est placé un puits quantique (une ou plusieurs couches) composé d'un alliage de nitrure de gallium et d'indium d'une épaisseur de quelques nanomètres. L'ensemble est relié à une alimentation électrique. Pour cela, on dépose un contact métallique sur le nitrure de gallium de type *p*

en prenant soin de ne pas recouvrir toute la surface, pour ne pas absorber la lumière émise. Le deuxième contact est placé sur la couche de type *n* après gravure de la structure. La taille des LED varie de 0,3 millimètre de côté pour les LED standards à plus d'un millimètre pour les LED blanches de puissance.

Dans le puits quantique, les électrons et les trous se recombinent et émettent un rayonnement bleu (b). La LED est recouverte d'un luminophore qui absorbe de la lumière bleue et réémet dans le jaune (c). L'épaisseur du luminophore est choisie de telle sorte qu'une partie seulement de la lumière bleue est absorbée. En ajustant les rapports d'intensité entre bleu et jaune, la lumière perçue est blanche.

possible. Ces défauts créent en effet des niveaux d'énergie autorisés dans la bande interdite. Les électrons ne passent alors plus directement de la bande de conduction à la bande de valence en émettant un photon visible. Ils sont captés par ces nouveaux états, des « pièges » qui dissipent l'énergie de l'électron sous forme de vibrations du réseau cristallin. Il n'y a plus émission de photon: le retour à l'état fondamental de l'électron est « non radiatif ».

On a pu contourner cet obstacle dans les LED bleues à base de nitrure de gallium et obtenir un bon rendement quantique interne. Ce dernier est défini comme le rapport du nombre de photons émis au nombre d'électrons injectés provenant du courant électrique qui alimente la jonction *p-n*. Si les électrons étaient captés par les pièges non radiatifs, le rendement quantique interne serait très faible. Cependant, en ajoutant dans le semi-conducteur une couche de quelques nanomètres d'épaisseur de nitrure de gallium contenant de l'indium, on crée un puits quantique, où les électrons et les trous tombent (voir l'enca-

dré page 35). Les puits quantiques constitués de nitrure ont la particularité de piéger les électrons et les trous qui n'ont plus la possibilité de se déplacer et, ainsi, rencontrer une dislocation. En revanche, les porteurs de charge se recombinent et donnent ainsi lieu à une émission de photons.

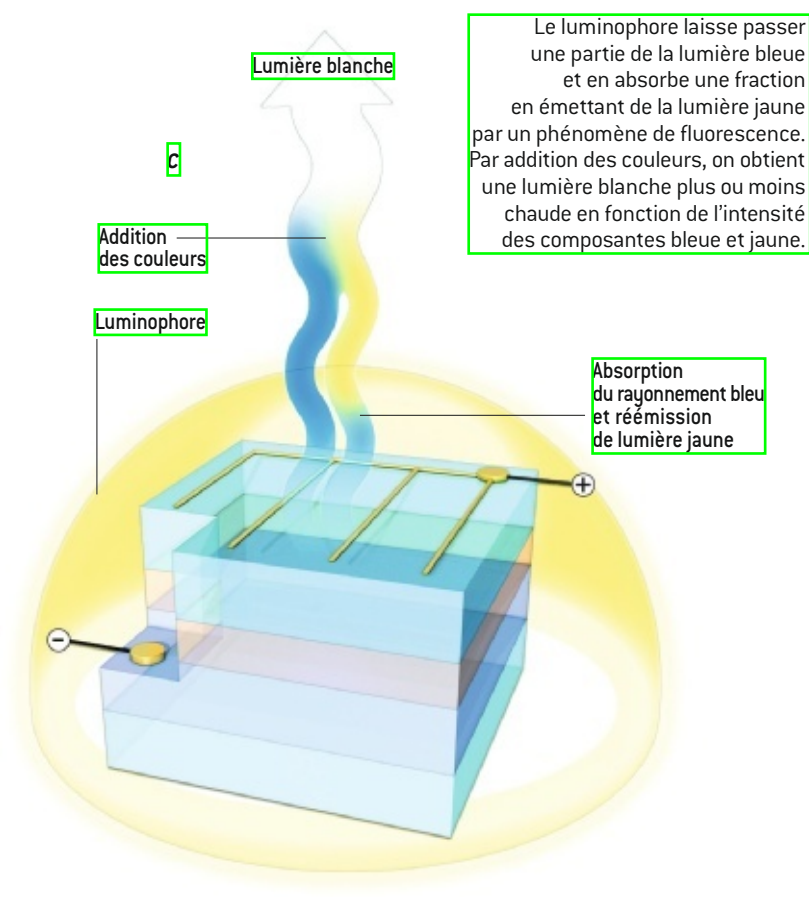
Extraire les photons

Il ne suffit pas d'avoir un excellent rendement quantique interne, encore faut-il pouvoir extraire les photons du cœur de la LED avant qu'ils ne soient réabsorbés par le matériau lui-même. Or du fait de la forte interaction entre la lumière et la matière dans les semi-conducteurs, l'indice de réfraction est élevé (2,4 pour le nitrure de gallium). Le photon doit parvenir quasi perpendiculairement à la surface pour s'échapper; sinon, il est réfléchi vers l'intérieur du matériau et finit par être réabsorbé. Seule une petite fraction de photons sortira de la LED.

Pour y remédier et augmenter le rendement, deux approches sont possibles.

D'une part, on peut réduire le volume total du dispositif, afin de limiter la probabilité que le photon soit réabsorbé. Pour ce faire, la couche de semi-conducteur doit être très mince, inférieure au micromètre, ce qui limite le trajet du photon et les risques d'absorption. D'autre part, on peut limiter les réflexions internes multiples si la surface est très rugueuse: un plus grand nombre d'orientations de la surface augmente la probabilité que le photon y arrive avec un bon angle. Le coefficient d'extraction – la proportion de photons qui sortent de la LED – dans une LED bleue dépasse 90 pour cent. Mais une part des photons est perdue à cause d'autres phénomènes de réflexion et d'absorption qui apparaissent lors de l'intégration de la LED au sein de la lampe.

Le rendement quantique interne et l'efficacité d'extraction ne sont pas tout. Il faut aussi considérer le rendement à la prise, c'est-à-dire la puissance optique émise par rapport à la puissance électrique injectée. Il est de 60 pour cent pour les meilleures LED bleues. Pourquoi n'est-il pas plus élevé? Pour obtenir un photon bleu de



nue à partir des photons de la LED bleue dont une partie traverse le luminophore et l'autre excite le matériau fluorescent, qui réémet dans le jaune (voir l'encadré ci-contre). On peut moduler les émissions bleue et jaune en choisissant l'épaisseur du luminophore – qui absorbe ainsi plus ou moins le bleu –, de façon à produire un blanc au ton chaud ou froid. Certains luminophores ont un aspect plus orangé, ce qui donne un blanc chaud. Le rendement de conversion du luminophore est un facteur important : pour les meilleurs d'entre eux, il est de 90 pour cent et ne se dégrade pas au fil du temps. Toutefois, la fluorescence dégrade inéluctablement une partie de l'énergie, puisque la conversion d'un photon bleu en photon jaune s'accompagne d'une perte d'énergie sous forme de chaleur.

Trois LED pour de la lumière blanche ?

Une solution favorable sur le plan énergétique consisterait à s'affranchir du luminophore et à produire de la lumière blanche en combinant trois LED constituées de semi-conducteurs émettant dans le bleu, le vert et le rouge, respectivement. Si les LED bleues et rouges présentent d'excellents rendements lumineux, ce n'est pas le cas des LED vertes, conçues avec les mêmes matériaux que les LED bleues et pour lesquelles le rendement quantique interne s'écroule lorsqu'on augmente la longueur d'onde : il passe de 90 à 30 pour cent. Si les semi-conducteurs à base de nitrure de gallium sont peu performants dans le vert, les autres matériaux ne font guère mieux. C'est le *green gap*, qui est au cœur des recherches dans le domaine des matériaux pour l'optoélectronique.

Une lampe composée de trois LED serait complexe à réaliser, car en plus du manque de vert efficace, le rendement des LED rouges et leurs longueurs d'onde varient avec la température. La lampe nécessiterait alors un système d'alimentation complexe, qui pourrait inclure par exemple un contrôle continu de la qualité du blanc. Si ces problèmes étaient résolus, cette lampe serait sans doute la source de lumière idéale : elle présenterait un excellent rendement lumineux et pourrait fournir un blanc modulable à volonté, capable de reproduire l'atmosphère bleutée de l'aube ou le rougeolement du couchant.

Les lampes à LED blanches disponibles sur le marché ont des caractéristiques

2,7 électronvolts, il faut exciter un électron avec la même énergie. Or l'énergie d'un électron est le produit de sa charge électrique par la tension appliquée. Idéalement, une LED bleue devrait ainsi fonctionner avec une tension d'environ 2,7 volts. Cependant, si la conductivité électrique des matériaux est mauvaise ou si les contacts métalliques déposés sur les semi-conducteurs présentent une certaine résistance, il faut augmenter la tension d'alimentation.

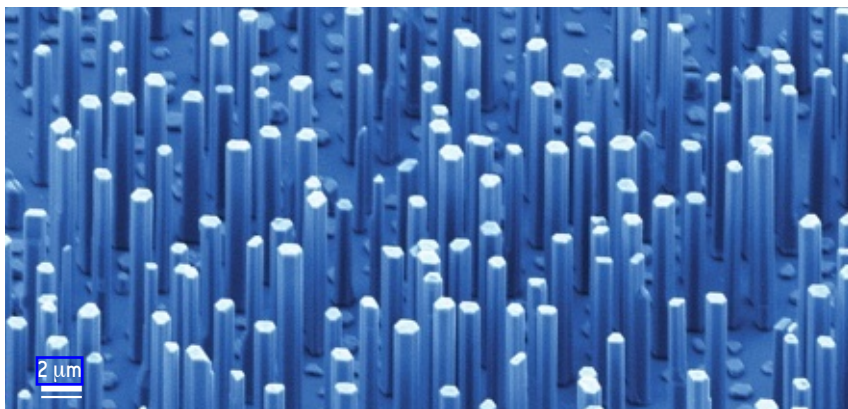
Ce problème est d'importance avec les LED au nitrure de gallium, car elles fonctionnent avec un courant intense. En effet, le nitrure de gallium étant coûteux, on l'utilise dans des dispositifs de petite taille. Dès lors, pour compenser les dimensions réduites et produire un maximum de lumière, un courant élevé, de l'ordre de l'ampère, est nécessaire. Mais, en plus d'abaisser le rendement à la prise, les effets résistifs se traduisent par un échauffement notable du dispositif, qui peut détériorer ses performances et sa durée de vie.

La qualité des matériaux et des contacts dans les LED au nitrure de gallium a connu

d'importants progrès, mais l'usage de courants intenses se heurte à un autre phénomène qui limite le rendement. L'efficacité peut chuter de plus de 50 pour cent entre sa valeur maximale obtenue à faible courant (typiquement quelques milliampères pour un dispositif de un millimètre carré) et celle mesurée à un ampère.

Ce phénomène serait dû à « l'effet Auger », où l'énergie libérée par la recombinaison électron-trou ne se retrouve pas sous forme de photon, mais est transférée à un électron de la bande de conduction sous la forme d'énergie cinétique. Comme cet effet est proportionnel au cube de la densité de porteurs de charge, il devient vite prépondérant aux courants intenses. Ainsi, les LED blanches sont généralement alimentées par un courant plus faible, de l'ordre de 0,35 ampère.

Malgré toutes les difficultés mentionnées, il est aujourd'hui possible de produire des LED bleues efficaces. Pour obtenir de la lumière blanche, la LED est encapsulée dans un luminophore, un matériau fluorescent. La lumière blanche est alors obtenue



2. DES COLONNES DE NITRURE DE GALLIUM de quelques centaines de nanomètres de diamètre, observées au microscope électronique à balayage, sont une piste d'avenir pour fabriquer des cristaux sans défauts sur un substrat de silicium. Chaque colonne pourrait être transformée en une LED. Mises en parallèle, ces LED formeraient des lampes aux performances exceptionnelles.

L'AUTEUR



Nicolas GRANDJEAN est professeur de physique et dirige l'Institut de physique de la matière condensée à l'École

polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), en Suisse.

BIBLIOGRAPHIE

L. Zuppiroli et D. Schlaepfer, *Lumières du futur*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2011.

P. Mottier, *Les diodes électroluminescentes pour l'éclairage*, Hermes/Lavoisier, 2008.

B. Johnstone, *Brilliant !: Shuji Nakamura and the Revolution in Lighting Technology*, Prometheus Books, 2007.

très compétitives, avec un rendement lumineux s'élevant jusqu'à 100 lumens par watt (pour des densités de courant de l'ordre de 35 milliampères par millimètre carré), une bonne qualité de lumière et une durée de vie de l'ordre de 50 000 heures. Cependant, le prix d'achat est l'obstacle principal à leur diffusion massive. Il faut déboursier environ 40 euros pour une lampe à LED équivalente à une ampoule à incandescence de 60 watts.

Si les prix ont baissé de 40 pour cent aux États-Unis en 2011, de nouvelles techniques de production peuvent encore les réduire. Le nitrure de gallium est aujourd'hui fabriqué sur un substrat de saphir de 100 millimètres de diamètre. Il serait possible de doubler le diamètre du substrat d'ici quelques années.

Une autre approche serait de remplacer le saphir par du silicium, qui est moins cher et dont la taille standard est de 30 centimètres de diamètre. Le nitrure de gallium produit sur du silicium rattrape en qualité celui fabriqué sur du saphir, ce qui était le principal obstacle de cette technique.

Toujours dans l'optique de fabriquer moins cher, une solution innovante consiste à faire croître le nitrure de gallium en colonnes ou pyramides de tout petit diamètre, de 0,1 à 1 micromètre (voir la figure 2). Cette technique permet non seulement d'obtenir une qualité cristalline parfaite, mais aussi un coefficient d'extraction des photons très élevé, en raison de la grande surface présentée par cette structure. La fabrication du nitrure de gallium de qualité sur un substrat de silicium permettrait d'obtenir un semi-conducteur bon marché. Cependant, il faut garder à l'esprit

que la LED n'est qu'un des éléments qui constituent la lampe. Elle ne représente que 15 à 20 pour cent du coût total. Il faut considérer, par exemple, le système d'alimentation électrique pour adapter la tension au fonctionnement de la LED.

Un autre enjeu majeur des lampes à LED est l'aspect thermique. Le rendement à la prise est dix fois supérieur à celui d'une lampe à incandescence, mais près de la moitié de l'énergie électrique est dissipée en chaleur dans le petit volume de la LED, à cause des effets résistifs et de la perte d'énergie par la fluorescence dans le luminophore. La gestion de la température est cruciale pour ne pas endommager la lampe. Des dissipateurs thermiques en aluminium évacuent la chaleur et évitent que la LED se dégrade.

Un point à considérer lors de la conception d'une lampe à LED concerne la diffusion de la lumière. Une LED est une source lumineuse ponctuelle et, *de facto*, peu agréable pour l'œil. L'une des solutions envisagées par de nombreux constructeurs consiste à intégrer un grand nombre de LED de faible puissance afin de limiter l'éblouissement. Une autre solution repose sur l'intégration du luminophore au diffuseur de la lampe.

Des lampes peu polluantes

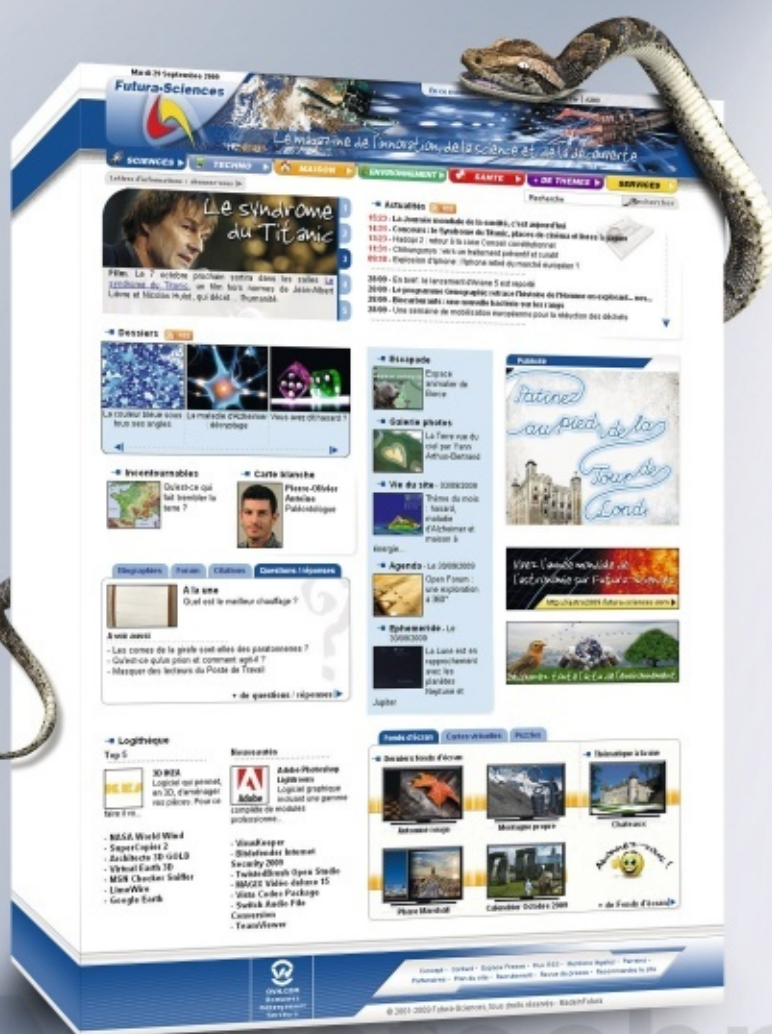
Les contraintes techniques pour le bon fonctionnement des lampes à LED blanches font qu'elles resteront probablement assez coûteuses à fabriquer. Néanmoins, si l'on tient compte de leur durée de vie exceptionnelle et de leur rendement, ces sources de lumière sont tout à fait compétitives. D'un point de vue environnemental, une étude du Département de l'énergie des États-Unis a comparé le cycle de vie, de la fabrication au recyclage, des lampes fluocompactes et des lampes à LED blanches. Les secondes sont beaucoup moins nocives et n'utilisent par exemple pas de mercure, contrairement aux premières.

La même étude compare aussi la consommation électrique de ces deux types de lampes de nouvelle génération. Aujourd'hui, les lampes à LED ont déjà un rendement équivalent, voire supérieur, à celui des lampes fluocompactes pour produire la même quantité de lumière. Elles présentent en plus d'importantes perspectives d'innovation et d'optimisation, ce qui devrait leur assurer un bel avenir. ■

Futura-Sciences, le magazine de la découverte, de la science et de l'innovation



WWW.FUTURA-SCIENCES.COM



• **Actualités** : l'actu des sciences et des technologies analysée en continu.

• **Dossiers** : du réchauffement climatique à la grippe A, les enjeux clés en images avec plus de 800 dossiers.

• **Forums** : 50 forums thématiques pour poser toutes vos questions et échanger avec 300 000 membres.

• **Questions / réponses** : des réponses simples à des questions du quotidien.

• **Services** : fonds d'écran, cartes virtuelles emploi, téléchargements, puzzles...

Retrouvez tous ces thèmes sur
www.futura-sciences.com

Grippe A

Nutrition

Environnement

Jardinage



Le climat des exoplanètes

Kevin Heng

L'étude de l'atmosphère des planètes extrasolaires est désormais à la portée des astronomes. On parvient aujourd'hui à estimer la température et la vitesse des vents à la surface de certaines exoplanètes.

L'ESSENTIEL

■ On a découvert à ce jour plus de 800 exoplanètes et plusieurs centaines dont il faudra confirmer le statut.

■ Les méthodes de détection donnent aujourd'hui accès au spectre lumineux de certaines exoplanètes, ce qui permet d'étudier les propriétés de leur atmosphère.

■ Des modèles numériques, adaptés des modèles climatiques terrestres, reproduisent les caractéristiques de l'atmosphère des jupiters chauds, planètes géantes gazeuses relativement proches de leur étoile.

Ces dernières années, les astrophysiciens ont découvert de nombreuses planètes extérieures au Système solaire. En deux ans, le télescope spatial *Kepler* a localisé plus de 2 000 candidates au titre d'exoplanète, et de l'eau liquide pourrait être présente sur certaines dont la taille est proche de celle de la Terre. Ces objets – qui semblent fréquents dans la galaxie – restent minuscules aux « yeux » des télescopes actuels, mais l'amélioration des techniques permet d'étudier leurs propriétés. Au point qu'établir une carte des températures et des vents de leurs atmosphères ne relève plus de la science-fiction.

Complétant les nombreux relevés du ciel nocturne effectués depuis le sol, les télescopes spatiaux *Hubble*, *Kepler* et *Spitzer* observent le cosmos sans être gênés par l'atmosphère terrestre. Ces instruments détectent une exoplanète en enregistrant la baisse de luminosité au moment où l'objet, situé sur une orbite que l'on voit par la tranche, passe devant son étoile hôte (méthode dite du transit). Depuis quelques années, les astronomes sont capables de détecter la baisse de lumino-

sité due au passage d'une planète derrière son étoile, l'« éclipse secondaire ». En d'autres termes, les techniques astronomiques ont tant progressé que l'on peut détecter à quel moment une étoile masque la lumière de son exoplanète.

Le spectre des exoplanètes devient accessible

Cet effet est faible, tout au plus quelques pour mille dans le rayonnement infrarouge et beaucoup moins dans le visible. Lors d'une éclipse secondaire, la lumière d'un système exoplanétaire est uniquement celle de l'étoile, et ces données permettent de calculer les contributions respectives de chacun des deux astres, notamment la lumière de l'exoplanète et de son atmosphère. Grâce à une telle technique, les astronomes ont effectué les premières détections de la lumière directement émise par une exoplanète, dont le maximum de luminosité se situe généralement dans l'infrarouge.

La mesure des transits et des éclipses à différentes longueurs d'onde permet de



1. L'EXOPLANÈTE HD 189733B

est un jupiter chaud, une géante gazeuse proche de son étoile *(ici dans une vue d'artiste)*.

De nouvelles techniques permettent de mesurer la vitesse des vents dans son atmosphère et de cartographier la température de sa surface.



NASA

2. LE TÉLESCOPE SPATIAL HUBBLE (ci-dessus), ainsi que les observatoires *Spitzer* et *Kepler*, sont les principaux outils dans l'étude des exoplanètes. Ils permettent d'étudier les propriétés de l'atmosphère de ces planètes (composition chimique, température et vitesse des vents).

construire un spectre de l'atmosphère exoplanétaire. Certaines longueurs d'onde étant absorbées par ses constituants, l'analyse spectrale livre la composition de l'atmosphère et les abondances des éléments qu'elle contient.

Cartographier la luminosité d'une exoplanète

Dans certains cas, les astronomes ont réussi à enregistrer les variations de la luminosité de l'exoplanète au fil de sa révolution autour de l'étoile, variations qui constituent sa « courbe de phase ». À partir de cette dernière, Nick Cowan, de l'Université *Northwestern*, et Eric Agol, de l'Université de Washington, ont développé une « carte de brillance », qui décrit la luminosité de l'exoplanète en fonction de la longitude, mais moyennée sur la latitude. Et des travaux récents des mêmes chercheurs ont livré des informations sur la brillance de l'exoplanète HD 189733b dans les deux dimensions, c'est-à-dire en fonction de la longitude aussi bien que de la latitude. La brillance étant liée à la température de l'atmosphère, cela signifie l'avènement d'une cartographie climatique des exoplanètes !

Les astronomes ne sont pas limités à la méthode des transits. Ils utilisent aussi la méthode des vitesses radiales, qui consiste à mesurer les mouvements de l'étoile autour du centre de masse du système formé par l'étoile et ses planètes.

La combinaison des deux techniques permet de détecter une exoplanète et de déterminer son rayon et sa masse. La catégorie de planètes la plus simple à détecter par ces méthodes est celle des jupiters chauds, qui sont des géantes gazeuses, comme Jupiter dans le Système solaire, mais beaucoup plus proches de leur étoile. Leur température de surface est comprise entre 1000 et 3000 kelvins.

Leur distance à l'étoile est si petite, de l'ordre d'un dixième ou moins d'unité astronomique (la distance moyenne de la Terre au Soleil), que la découverte des jupiters chauds a surpris la communauté astronomique. En effet, d'après les théories de formation des planètes, il ne devrait pas y avoir assez de matière, à de si faibles distances, pour former une géante gazeuse. Il est probable que les jupiters chauds se sont formés plus loin et ont migré à proximité de leur étoile par des mécanismes encore mal connus.

Les jupiters chauds sont un laboratoire privilégié pour l'étude des atmosphères extrasolaires. Leur densité, de l'ordre de un gramme par centimètre cube, suggère que leur enveloppe gazeuse est constituée principalement d'hydrogène moléculaire. Il pourrait s'agir d'atmosphères primaires, qui reflètent la composition de la nébuleuse primordiale à partir de laquelle se sont formées les planètes.

Plusieurs millions d'années après la formation de l'exoplanète, les forces de marée exercées par l'étoile sur la planète ont conduit cette dernière à un état de rotation synchronisée, où un hémisphère fait

toujours face à l'étoile, tandis que l'autre est plongé dans une perpétuelle obscurité. Un exemple plus familier est celui de la Lune, qui est dans un état de rotation synchronisée par rapport à la Terre (si l'on néglige de minuscules corrections nommées libérations).

Un jour sans fin

Cette configuration inhabituelle, avec un hémisphère où le jour est perpétuel et l'autre où la nuit est permanente, ouvre à l'exploration un régime de circulation atmosphérique inexistant dans le Système solaire, et offre aux théoriciens l'occasion de tester leurs outils en territoire inconnu.

Pour comprendre ces atmosphères joviennes chaudes, il faut clarifier les interactions complexes entre le rayonnement stellaire, la dynamique et la chimie atmosphériques, et des champs magnétiques éventuels. Les jupiters les plus chauds présentent un net contraste entre leur moitié chaude et brillante et leur moitié froide et sombre. La courbe de phase, qui, rappelons-le, donne la luminosité de la planète, est une fonction sinusoïdale ; elle atteint son maximum lors de l'éclipse secondaire et son minimum durant le transit. Tout décalage du maximum de la courbe par rapport à son point de référence (l'instant central de l'éclipse secondaire) peut être interprété comme étant dû à la présence de vents atmosphériques horizontaux, qui transportent la chaleur du côté jour vers le côté nuit (voir l'encadré page ci-contre). Ce décalage a été mesuré pour la première fois pour l'exoplanète HD 189733b par Heather Knutson, de l'Institut de technologie de Californie, et ses collègues : ils ont rapporté un décalage du pic d'environ 30 degrés dans la direction de la rotation. Le décalage angulaire a également été mesuré pour les jupiters chauds *Upsilon Andromedae b* et *WASP-12b*.

L'équipe de Ignas Snellen, de l'Université de Leyde, a mis à contribution le VLT (*Very Large Telescope* ou Très grand télescope), au Chili, et a utilisé la technique de spectroscopie d'absorption pour mesurer la vitesse des vents horizontaux sur le jupiter chaud HD 209458b. Ces astronomes se sont intéressés à une raie d'absorption du monoxyde de carbone, qui subit un décalage de longueur d'onde par effet Doppler à cause des mouvements de l'atmosphère. L'équipe a déterminé que les vents soufflent sur

HD 209458b à environ deux kilomètres par seconde, soit une centaine de fois plus vite que les vents terrestres.

Ces découvertes marquent l'aube de la météorologie exoplanétaire. L'intérêt pour ce nouveau domaine commence à s'étendre à des champs apparentés : les sciences de l'atmosphère et la climatologie, la géophysique et la planétologie. Des chercheurs d'horizons divers se voient confrontés à des conceptions et pratiques scientifiques différentes, en particulier pour la modélisation des phénomènes. C'est particulièrement saillant lors des conférences interdisciplinaires où nous avons du mal à comprendre nos jargons respectifs. Les spécialistes de l'atmosphère et du climat, comme les géophysiciens, travaillent sur des bases de données riches et fiables, car ils vivent au sein de leur système d'étude. Cependant, les observations sont si fines qu'aucun modèle ne peut rendre compte de tous les phénomènes observés. Il est nécessaire d'utiliser plusieurs échelles de modélisation, chacune isolant certains aspects clefs de la physique.

Une dynamique différente de celle de la Terre

L'étude des exoplanètes se limite essentiellement à scruter des sources ponctuelles dans le ciel nocturne. Bien que nous sachions obtenir des informations spectrales et temporelles détaillées sur ces sources ponctuelles, l'obtention d'informations spatiales reste un défi. Les planétologues du Système solaire ont la chance de disposer de clichés de la surface de Mars ou des motifs météorologiques de Jupiter. Ce n'est pas le cas pour les exoplanètes, et les astrophysiciens doivent travailler à partir de données limitées, qui s'accompagnent d'une multitude de restrictions pour les exploiter et construire des modèles.

Les connaissances accumulées sur la Terre et les planètes du Système solaire sont un guide précieux pour aborder le climat des exoplanètes, mais elles ne s'appliquent pas nécessairement aux autres planètes. Un exemple concret est donné par les atmosphères des jupiters chauds : certaines longueurs caractéristiques (tailles des courants ou des tourbillons) sont inférieures au rayon des planètes dans le Système solaire, mais elles sont comparables au rayon pour les jupiters chauds.

Cela implique que les propriétés de l'atmosphère des jupiters chauds ont une étendue globale, sur l'ensemble de la planète. Les atmosphères des exoplanètes proches de leur étoile présentent alors un régime de circulation qui est inconnu dans le Système solaire. Les simulations des flux atmosphériques doivent donc être globales et non locales.

Dans le cas du Système solaire, les chercheurs se sont rendu compte que les atmosphères planétaires sont des entités

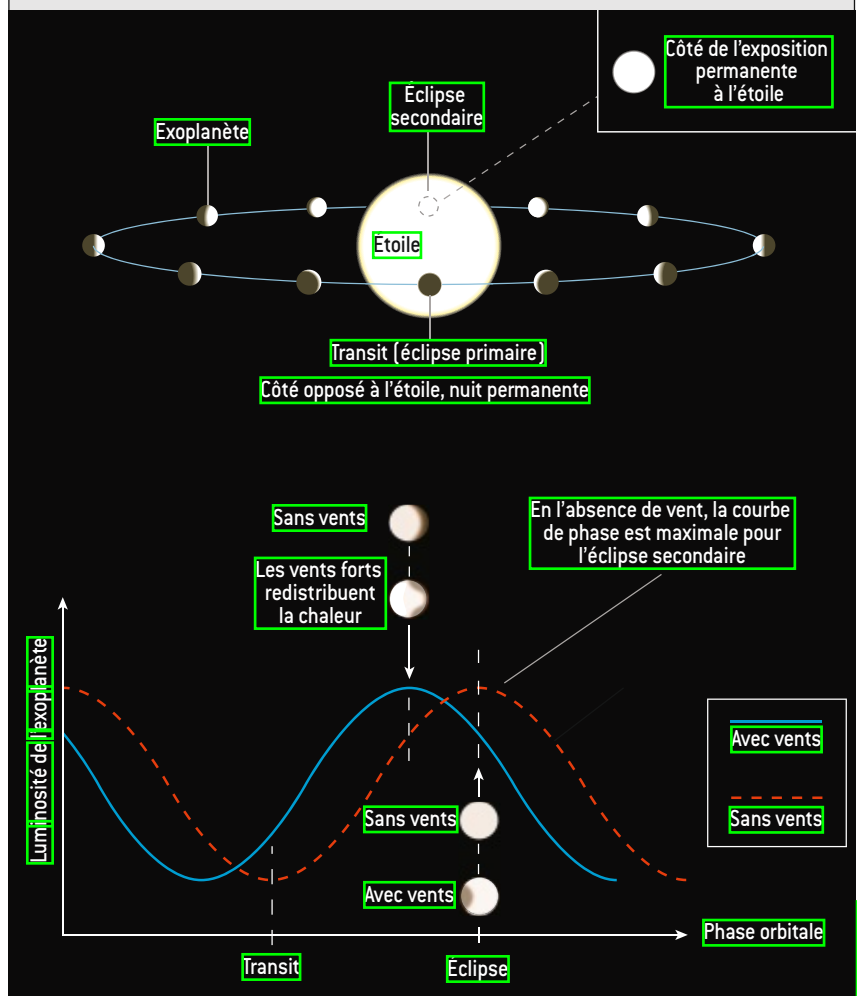
complexes, soumises à diverses interactions présentant des signatures chimiques, dynamiques et radiatives sur des échelles de temps très diverses. Isaac Held, du Laboratoire de dynamique des fluides géophysiques de Princeton, dans le New Jersey, a affirmé que, pour bien comprendre ces systèmes complexes, il faut construire une hiérarchie de modèles théoriques.

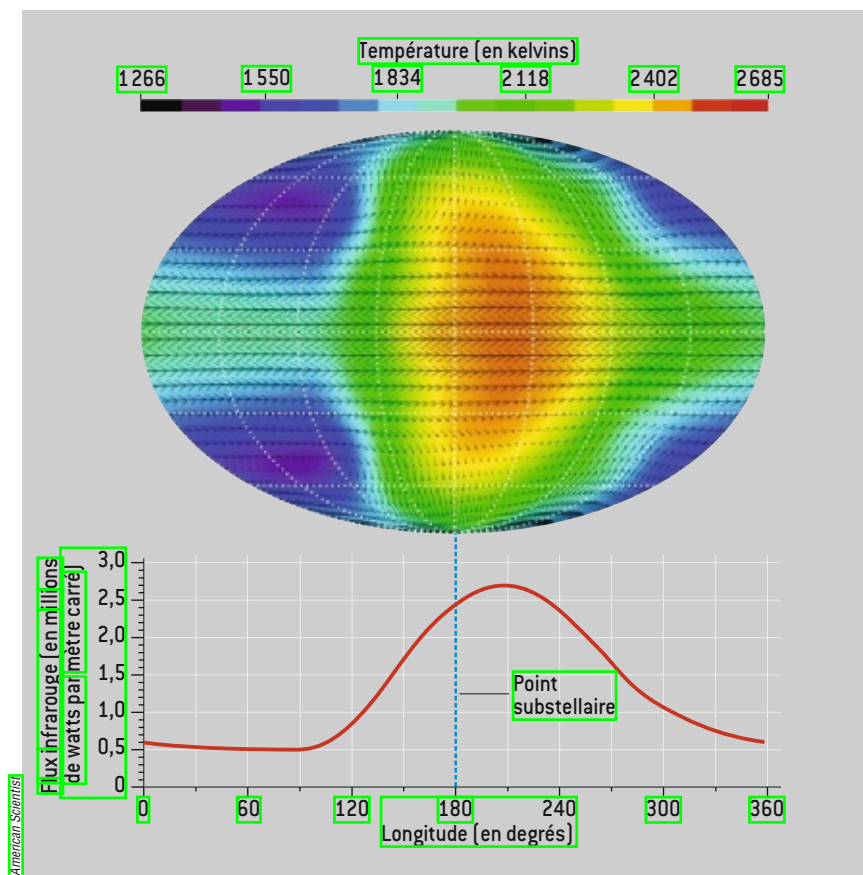
Ces simulations vont des modèles analytiques unidimensionnels qui isolent un élément physique clef aux modèles

TRANSIT ET COURBE DE PHASE

Les atmosphères planétaires absorbent et réémettent le rayonnement de leur étoile. Quand une exoplanète dont on voit l'orbite de profil passe devant son étoile, elle entraîne une éclipse primaire ou *transit*, associée à une légère baisse de luminosité. L'éclipse secondaire correspond au passage de la planète derrière l'étoile.

La plupart des exoplanètes détectées seraient en rotation synchronisée, avec un côté jour permanent faisant face à l'étoile, et un côté nuit permanent. L'étude de l'émission lumineuse de la planète permet d'obtenir la courbe de phase, une courbe de luminosité en fonction des phases de l'orbite. Sans vents, la courbe de phase est, en principe, à son maximum pendant l'éclipse secondaire (mais masquée par l'étoile), mais s'il y a des vents qui redistribuent la chaleur (et donc le rayonnement infrarouge) autour de l'atmosphère exoplanétaire, ce pic sera décalé (en bas).





3. UN MODÈLE DE CIRCULATION GÉNÉRALE de l'atmosphère, initialement conçu pour la Terre, a été adapté pour simuler une carte de la température et de la vitesse des vents pour une atmosphère jovienne chaude (*en haut*). La couleur traduit la température, tandis que les flèches indiquent la vitesse du vent (de l'ordre du kilomètre par seconde). La carte de luminosité en fonction de la longitude, moyennée sur la latitude (*en bas*), montre un décalage angulaire du maximum par rapport au point substellaire (longitude pour laquelle l'étoile est au zénith). Cela indique la présence de vents atmosphériques qui redistribuent la chaleur du côté jour au côté nuit.

tridimensionnels complets de circulation générale utilisés pour les prévisions climatiques et météorologiques, qui intègrent de nombreux phénomènes pour restituer les interactions de l'atmosphère, des continents et des océans sur la Terre. Ces modèles de circulation générale résolvent simultanément un ensemble d'équations qui traitent l'atmosphère comme un fluide ainsi qu'une équation thermodynamique, et tiennent compte de divers facteurs tels que le relief et le couvert végétal. Beaucoup de ces paramètres ne sont pas pris en compte dans les analyses théoriques des atmosphères exoplanétaires, et l'un des principaux défis est donc de déterminer comment et quand simplifier un modèle conçu initialement pour la Terre.

Délibérément ou non, les astrophysiciens se sont inspirés de cette approche et ont développé une hiérarchie de modèles théoriques allant de une à trois dimensions. Comme les traitements des jupiters

chauds et des naines brunes (des astres trop peu massifs par rapport aux étoiles pour permettre à leur noyau de développer et entretenir une fusion nucléaire) partagent plusieurs caractéristiques, beaucoup des modèles pionniers développés pour les naines brunes ont été transposés aux jupiters chauds.

Les premiers modèles se concentraient sur le spectre des jupiters chauds, et les traitements les plus élaborés s'inspirent des techniques utilisées en climatologie et en sciences de l'atmosphère. À partir du spectre d'une exoplanète, les astrophysiciens déterminent la composition chimique de l'atmosphère et le profil pression-température compatible avec les données. Par exemple, Nikku Madhusudan, de l'Université Yale, et ses collègues ont étudié le spectre de l'exoplanète WASP-12b. Ils en ont déduit un rapport carbone/oxygène élevé, double de celui de l'étoile. De nouvelles études indiquent que

le spectre pourrait être altéré par la présence d'une étoile proche. Le résultat reste à confirmer. Néanmoins, l'étude spectrale des exoplanètes est cruciale, car elle permet d'en déduire la composition, voire de fournir des indices précieux sur l'histoire de la formation de l'exoplanète.

Les astrophysiciens n'ont pas tardé à remarquer que la chimie atmosphérique et la dynamique se combinent de façon non triviale pour produire les caractéristiques d'un jupiter chaud que l'on observe. Adam Showman, à l'Université d'Arizona, a été l'un des premiers astrophysiciens à mettre à contribution la puissance des modèles de circulation générale pour étudier l'atmosphère des jupiters chauds.

À l'épreuve des jupiters chauds

Nous avons fait partie des chercheurs qui ont exploré cette voie. Ainsi, nous avons généralisé aux jupiters chauds l'étude climatique d'une (exo)planète. Le transport de chaleur de l'hémisphère diurne à l'hémisphère nocturne d'une exoplanète en rotation synchronisée peut être réduit à un problème bidimensionnel. Mais pour bien prendre en compte les échelles de temps et les perturbations radiatives, une analyse tridimensionnelle est nécessaire, ce qui impose l'utilisation des modèles de circulation générale. Nous avons résolu les équations de ces modèles par diverses techniques, puis comparé les résultats pour nous assurer de l'accord entre les méthodes.

Plusieurs équipes ont maintenant adapté avec succès les modèles de circulation générale à la modélisation des atmosphères exoplanétaires et obtiennent des résultats compatibles avec les observations. Les modèles de circulation générale seront encore plus pertinents avec l'étude d'exoplanètes ressemblant à la Terre par la taille et leur température.

Nous ne faisons que commencer à comprendre les propriétés essentielles des jupiters chauds, par exemple pourquoi certains semblent plus dilatés que d'autres et pourquoi certains paraissent redistribuer la chaleur plus efficacement de leur hémisphère diurne à leur hémisphère nocturne. Dans le cas de HD 189733b et HD 209458b, les spectres et courbes de phase calculés au moyen des modèles de circulation générale sont conformes aux observations. Tant que la

prochaine génération de télescopes spatiaux ne sera pas en service, ces exoplanètes resteront les références en matière d'atmosphères exoplanétaires. Elles illustrent déjà la richesse des informations qu'il est possible d'obtenir.

Ainsi, Frédéric Pont et David Sing, de l'Université d'Exeter, et leurs collègues ont étudié le spectre optique de HD 189733b au moyen du télescope spatial *Hubble*. Selon leurs résultats, l'atmosphère de cette exoplanète présenterait de la diffusion Rayleigh (le processus de diffusion de la lumière qui donne sa couleur au ciel terrestre, vu depuis le sol).

Quant au jupiter chaud HD 209458b, il apparaît nettement plus gros que ne le prévoient les calculs d'évolution d'une exoplanète qui se refroidit après sa formation. Selon l'une des idées avancées pour expliquer l'inflation du rayon, les atmosphères de jupiters chauds partiellement ionisées se comporteraient comme des circuits électriques géants qui, en présence d'un champ magnétique, obéissent à la loi de Lenz (le système réagit de façon à s'opposer aux variations du flux magnétique). Des courants électriques et des forces opposées seraient alors induits par les vents horizontaux, d'où la dissipation d'énergie

L'AUTEUR



Kevin HENG est astrophysicien à l'Institut d'astronomie de l'École polytechnique fédérale de Zurich, en Suisse.

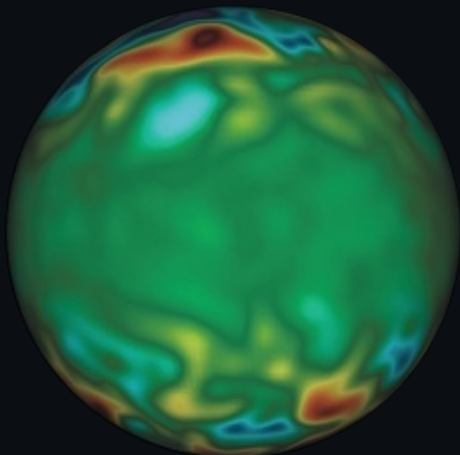
Article publié avec l'aimable autorisation de *American Scientist*.

DES DYNAMIQUES ATMOSPHÉRIQUES DIFFÉRENTES

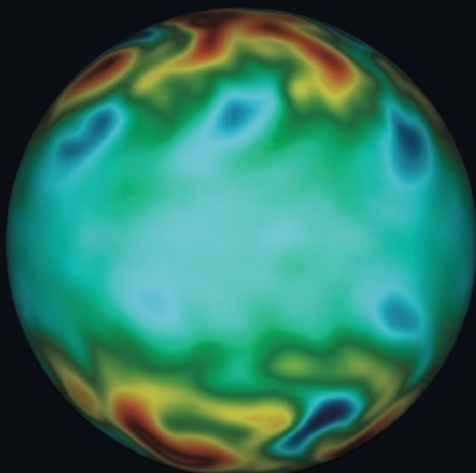
Des simulations numériques reproduisent la dynamique de l'atmosphère des exoplanètes. Adaptées des modèles terrestres, elles sont modifiées en fonction de la configuration spécifique de l'exoplanète, de sa distance à son étoile, de sa période de révolution et des vents à sa surface. Une planète de type Terre (a et b), avec une température de l'ordre de 300 kelvins (27 °C), présente de nombreuses fluctuations locales de température. Un jupiter chaud est une planète géante gazeuse très proche de son étoile. Les effets de marée ont conduit à une synchronisation de

sa rotation avec un hémisphère toujours orienté vers l'étoile (c), dont la température est de l'ordre de 3 000 kelvins, et une face orientée vers l'espace (d) où la température est voisine de 1 000 kelvins. L'atmosphère a un régime stable, traversé par des vents forts de l'ordre de un kilomètre par seconde, qui transfèrent une partie de la chaleur de la face éclairée vers la face sombre. Les simulations mettent en évidence ces phénomènes de transfert de chaleur (les couleurs des échelles de températures sont différentes entre les figures de la planète de type Terre et le jupiter chaud).

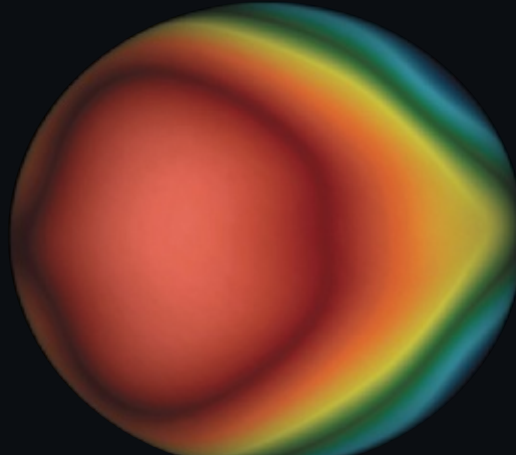
a



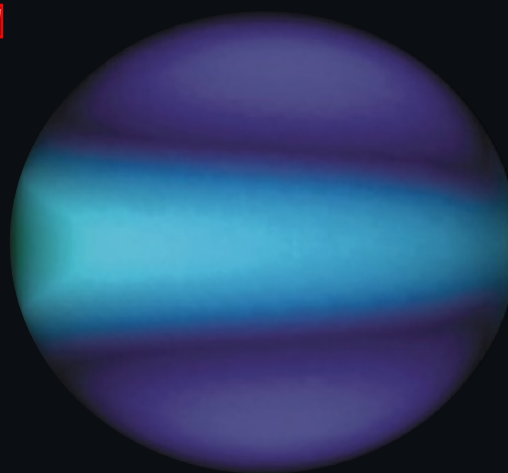
b



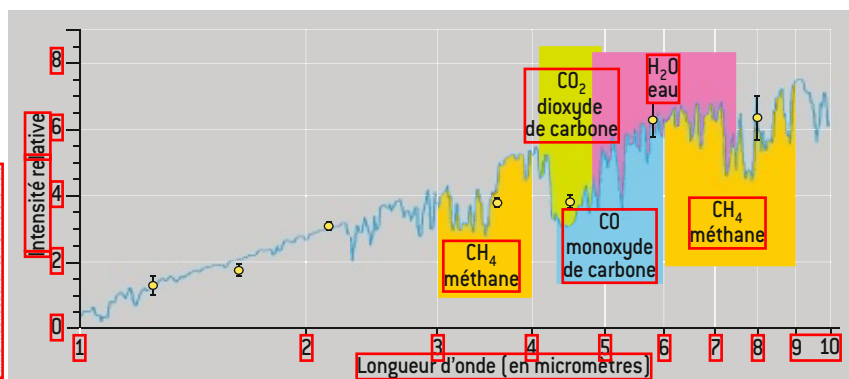
c



d



Kevin Heng



4. LE SPECTRE D'UNE EXOPLANÈTE, ici le cas d'un jupiter chaud, WASP-12b, permet d'étudier la composition chimique de son atmosphère. Certaines raies sont caractéristiques de composés tels que le méthane, le dioxyde de carbone, le monoxyde de carbone ou l'eau. Les données (points jaunes) sont compatibles avec un modèle de spectre d'émission (courbe bleue).

BIBLIOGRAPHIE

K. K. Heng *et al.*, Atmospheric circulation of tidally locked exoplanets: A suite of benchmark tests for dynamical solvers, *MNRAS*, vol. 413, pp. 2380-2402, 2011.

J. A. G. Snellen *et al.*, The orbital motion, absolute mass and high-altitude winds of exoplanet HD 209458b, *Nature*, vol. 465, pp. 1049-1051, 2010.

D. Charbonneau *et al.*, A super-Earth transiting a nearby low-mass star, *Nature*, vol. 462, pp. 891-894, 2009.

Exoplanètes, des centaines de nouveaux mondes à explorer, *Dossier Pour la Science*, n° 64, juillet-septembre 2009.

H. A. Knutson *et al.*, A map of the day-night contrast of the exoplanet HD 189733b, *Nature*, vol. 447, pp. 183-186, 2007.

J. M. Held, The gap between simulation and understanding in climate modeling, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 86, pp. 1609-1614, 2005.

mécanique en chaleur, et cette dernière dilaterait certains jupiters chauds. Il reste toutefois à montrer que les jupiters chauds présentent un champ magnétique, à l'instar de la Terre et de certaines des planètes du Système solaire.

L'étude des jupiters chauds est importante parce que nous avons assez de données pour tester nos hypothèses et nos modèles d'atmosphères, ce qui permet d'affûter nos outils théoriques avant de les appliquer à des exoplanètes comparables à Neptune ou même à la Terre, pour lesquelles les données sont actuellement rares, voire inexistantes.

Pour de nombreux chercheurs, l'objectif est de détecter le spectre d'une exoplanète de type terrestre en orbite autour d'une étoile ressemblant au Soleil, où régneraient des conditions favorables au développement de la vie. Pour l'heure, une telle quête reste hors d'atteinte, et ne devrait même pas être à la portée de la prochaine génération de télescopes spatiaux.

En attendant, pour des astronomes tels que David Charbonneau, de l'Université Harvard, et Jill Tarter, de l'Institut SETI, une voie prometteuse pour détecter des super-terres potentiellement habitables (des exoplanètes de type tellurique ayant une masse et un rayon un peu supérieurs à ceux de la Terre) consisterait à les traquer autour de naines rouges (ou étoiles de type M).

Ces minuscules cousines de notre Soleil, deux à dix fois moins massives, représentent environ les trois quarts de la population stellaire de notre voisinage galactique. Il y a plusieurs avantages à les scruter. Leur température est inférieure à celle des étoiles de type solaire, ce qui implique que même 10 à 100 fois plus proches de l'étoile, leurs éventuelles exopla-

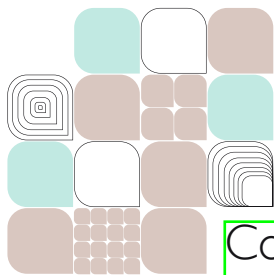
nètes pourraient conserver de l'eau liquide à leur surface. Et la proximité de l'étoile facilite la détection de ces planètes par les techniques astronomiques actuellement disponibles, à savoir la méthode du transit et celle des vitesses radiales.

Mais il y a un prix à payer : on s'attend à ce que les planètes soient en rotation synchronisée et qu'elles présentent des hémisphères où règne en permanence le jour ou la nuit, un peu comme leurs homologues joviens chauds. Les théoriciens craignent en conséquence que leur atmosphère ne disparaisse à cause de la condensation des molécules du côté nocturne et froid.

Du point de vue expérimental, la prochaine étape consiste à construire des télescopes spatiaux spécialement dévolus à la mesure des spectres d'exoplanètes sur de longues périodes et avec une résolution élevée. Plusieurs projets sont à l'étude, tels ECHO (*Exoplanet Characterization Observatory*) et FINESSE (*Fast Infrared Exoplanet Spectroscopy Survey Explorer*), proposés respectivement aux agences spatiales européenne et américaine. Si de telles missions se concrétisent, dans une décennie ou deux, elles nous livreront une mine d'informations spectrales et temporelles sur des centaines d'exoplanètes, à partir desquelles nous pourrions mieux connaître leurs atmosphères.

Des cycles de température

Nous pourrions ainsi discerner des variations de températures correspondant à des phénomènes périodiques. Une telle étude a été réalisée pour l'atmosphère terrestre, couvrant des échelles de temps allant de moins d'une journée (variations diurnes) à plusieurs millénaires (les cycles de Milankovitch, correspondant aux variations de l'orbite terrestre qui modifient la quantité de lumière reçue par la planète). Étant donné les nombreuses contraintes à satisfaire, il est vraisemblable que les missions spatiales ne pourront pas construire des spectres de puissance sur plus de quelques mois. Mais, de toute façon, il est probable que la partie intéressante de ces spectres est, pour les exoplanètes en orbite serrée comme les jupiters chauds ou les super-terres, concentrée sur des périodes plus courtes. Quoi qu'il en soit, ces mesures seront une étape supplémentaire dans la connaissance du climat des exoplanètes. ■



Compte rendu du 12^e symposium LVMH Recherche

Épuisement des ressources naturelles et matières premières cosmétiques : quelles stratégies d'avenir ?

12 septembre 2012, Paris

Aujourd'hui, plus personne n'ignore le fait que les ressources naturelles s'épuisent. Les impacts générés par les activités humaines deviennent de plus en plus préoccupants pour la planète et notre environnement. Les conséquences sur l'économie de demain seront importantes car, sur les marchés mondiaux, nous nous trouvons toujours au cœur d'un choc des ressources énergétiques et des métaux précieux, indispensables à notre mode de vie très technologique.

Les demandes de matières premières, d'eau et d'énergie (pétrole) explosent sous la pression démographique (neuf milliards d'individus en 2050), les besoins de consommation et les bouleversements technologiques nouveaux. Les faibles diversifications des pays producteurs, les risques géopolitiques, la diminution des surfaces agricoles, la dégradation des forêts, l'acidification des océans, l'accumulation des déchets, les recyclages insuffisants renforcent les craintes d'une issue irréversible pour l'espèce humaine.

La gestion des ressources des matières premières cosmétiques, leurs origines, leurs synthèses, l'essor des biotechnologies, les extractions des végétaux, l'amélioration « éco » des chaînes de conception des produits du marketing à la production constituent une préoccupation majeure de nos marques comme l'a précisé Monsieur Claude Martinez, Président de Parfums Christian Dior, représentant l'ensemble des marques de LVMH Recherche, en ouverture de ce symposium.

Aujourd'hui, analyses et projections les plus fines n'indiquent pas les solutions à mettre en place. C'est pour cette raison que LVMH Recherche a décidé de réunir au Collège des Bernardins à Paris, plus de 160 spécialistes issus d'horizons divers avec les acteurs majeurs du secteur cosmétique, afin de réfléchir collégialement aux stratégies et aux chantiers d'avenir. Imaginer de nouvelles matières premières, d'autres composites, de nouveaux polymères biosourcés, des matières novatrices totalement recyclables, peu énergivores... sont quelques-uns des thèmes qui ont été abordés.

Ressources, biodiversité et croissance

Le monde végétal et minéral a été utilisé par l'homme depuis les temps les plus anciens. Bois, charbons, minerais, plantes servaient à fabriquer des objets et à vivre au quotidien. Peu de superflu et une population mondiale relativement faible ne mettaient pas en danger les ressources de la planète qui paraissaient alors infinies. L'expansion démographique du XIX^{ème} associée aux débuts de l'industrialisation et de la consommation intensive du charbon fossile, de minerais ont commencé à créer des pollutions à grande échelle. L'utilisation du pétrole et l'essor de la chimie ne sont apparus que très récemment dans l'histoire de l'humanité. Le cours du pétrole brut a été multiplié par 8 en 20 ans. Son extrême abondance, son extraction facile à ses débuts, la surface de ses applications en ont fait une ressource de première importance pour le développement de notre mode de vie « moderne ». Nous observons aujourd'hui un regain d'intérêt pour une autre ressource, le gaz naturel, dont les prix sont sensibles aux tensions géopolitiques et dont les difficultés de transport et les coûts de transformation chimiques sont plus élevés. L'exploitation des nouvelles matières premières énergétiques ou sources d'une nouvelle chimie ne doivent pas entrer en concurrence avec la ressource alimentaire et la gestion de l'eau qui sont confrontées au choc démographique des cinquante prochaines années. Un autre grand défi sera de décarbonner l'atmosphère du carbone accumulé par la croissance industrielle de ces deux siècles derniers, a précisé le Professeur Chalmin de l'Université Paris Dauphine. Selon lui, la véritable rareté sera la rareté alimentaire, suite au réchauffement climatique pouvant se confronter aux turbulences des inégalités du développement économique mondial. Cette nouvelle géopolitique des ressources va modifier les comportements des acteurs économiques. La forte accélération de la croissance économique de ces 40 dernières années liée à l'augmentation de la productivité au détriment de la biodiversité, du respect des cultures

a conduit en de nombreux endroits vers plus de richesse globale, mais générant également davantage d'exclusion. Le contexte de la croissance moderne véhicule selon Olivier Dubigeon du cabinet Sustainway l'idée reçue qu'il existe un lien entre croissance et bien-être. De purement financière et économique, la crise se transforme en crise sociétale et fait alors apparaître un affaiblissement des repères et des structures de sociabilité traditionnelles. De nouveaux modes de consommation émergent : plus locaux, plus solidaires et plus collaboratifs. Les marques vont devoir intégrer intelligence rationnelle et émotionnelle pour donner davantage de sens à la consommation. La Responsabilité Sociétale des Entreprises « R.S.E. », les engagements pris doivent être démontrables et traçables pour établir des liens solides de confiance durable avec les consommateurs. Des tensions à l'accès des ressources, une certaine protection des matières premières, une utilisation durable des composants, le respect de la biodiversité et une traçabilité sociétale font partie des éléments clés du quotidien des grandes entreprises. Les sociétés doivent développer à tous les niveaux de l'entreprise la responsabilité sociétale par les pratiques quotidiennes, l'analyse des résultats des activités générées et une gouvernance impliquant un dialogue effectif des parties prenantes. Les liens entre sourcing et production doivent intégrer la prise en compte des impacts générés par les activités et développer l'équité via des partenariats privilégiés au sein de la chaîne de production. Aussi pour la R.S.E., l'évaluation des pratiques, et encore plus de leurs maturités sont des enjeux essentiels. Une table ronde animée par l'Association Vivagora a mis en évidence le lien étroit entre l'implémentation des actions de R.S.E., l'évaluation des pratiques et la diversité des métiers. Une gestion intégrée qui prend en compte le diagnostic partagé des enjeux, les usages et implique des acteurs dans les processus de décision permet de favoriser l'ancrage territorial d'une marque et donc de donner du sens, de façon pérenne, aux consommateurs. Au final, cela doit permettre, en sécurisant les filières créées, de fiabiliser les approvisionnements industriels dans un monde fluctuant et aux tensions fortes.

Evolution mondiale

Démographie	9 milliards d'individus en 2050
Urbanisation	7 milliards d'individus en 2050
Demande énergétique	+ 50% dès 2030
CO ₂	+ 50% dès 2030
Production agricole	+ 70% en 2050

Consommations mondiales

Pétrole	4 Gt/an dont 12% pour la chimie
Consommation industrielle	500 Mt/an ressources fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon) 300 Mt/an ressources renouvelables
Production mondiale de biomasse	120000 Mt/an
Nature de biomasse renouvelable	75% hydrates de carbone 20% dérivés cellulosiques 5% corps gras et protéines

Matières et enjeux de développement durable

Les enjeux planétaires de la chimie sont de répondre aux besoins accrus des populations dans un monde plus urbanisé. 80% de l'énergie consommée dans le monde provient de nos ressources fossiles. Or, l'ensemble des ressources terrestres n'est pas inépuisable et les contraintes réglementaires environnementales pour limiter les impacts négatifs de l'activité humaine sont deux facteurs clés qui bornent nos activités industrielles.

Économie d'atome, économie moléculaire, catalyse raisonnée sont des mots-clés de la chimie durable nommée aussi « green chemistry » de demain. Les ressources renouvelables sont un potentiel de substitution possible des ressources fossiles utilisées aujourd'hui. Les polymères issus de la pétrochimie sont entrés en force dans notre mode de vie. Et aujourd'hui les polymères biosourcés à base de céréales, de plantes à fibres, de bois, d'oléagineux, d'algues, font l'objet de l'attention des scientifiques et des industriels.

À côté des biomasses lignocellulosiques, de la biomasse glucidique, la biomasse oléagineuse s'intéresse aux huiles et aux corps gras, composés majeurs de formules cosmétiques.

90% de la production mondiale des corps gras est assurée par dix sources végétales traditionnelles dont trois utilisées à plus de 50% par la chimie. Si 74% des huiles et corps gras sont utilisés à des fins agroalimentaires, la chimie en utilise tout de même 10%. La transformation chimique des huiles et corps gras conduit à des matières entrant dans les domaines de la cosmétique, des détergents, biocarburants, lubrifiants, matériaux, encres, peintures... Comme l'a démontré Madame Carine Alfos, Directeur Innovation de l'ITERG, la question se pose aujourd'hui d'innover en développant des variétés végétales plus productives d'un métabolite spécifique donné, en remplaçant, en diversifiant certaines matières premières existantes ayant un impact négatif sur la biodiversité. C'est aussi en optimisant les variétés agronomiques et les

conditions de culture que l'on arrivera à améliorer des rendements de production de corps gras avec des profils moléculaires enrichis en micronutriments à haute valeur ajoutée.

Biosourcé ne signifie pas biodégradable a rappelé le Dr Sylvain Caillol de ChemSuD. C'est pourquoi la biodégradabilité et l'analyse complète du cycle de vie des matières sont nécessaires. Celles-ci doivent être associées à la hiérarchisation des impacts en analysant les transferts de pollution éventuels. Pour des raisons économiques, un produit biosourcé se doit d'apporter des bénéfices additionnels aux produits déjà existants pour que le consommateur le privilégie, a précisé Frédérique Lafosse de Soliance. La valorisation de la biomasse, les progrès techniques des bioraffineries permettent d'envisager l'avenir avec confiance et de recycler par des systèmes en boucle les déchets qui deviennent matières premières de nouveaux procédés. Le Grenelle de l'Environnement en France a consacré l'engagement des industriels de la chimie à utiliser 15% de matières premières renouvelables en 2017 et cet objectif sera probablement atteint. Un certain nombre d'industries s'orientent donc plus vers un choix de matières premières végétales plutôt que fossiles et une recyclabilité optimisée en fin de vie. Les ressources végétales doivent aussi être appréhendées dans une optique durable et éthique envers les pays et les populations qui les produisent. Mais ces productions ne doivent pas se faire en défaveur des cultures vivrières ni de l'extinction de la biodiversité. La lipochimie par exemple a accompli de grands efforts pour diversifier ses ressources, ce qui a en outre permis d'acquérir de nouvelles connaissances pour les process à grande échelle. Les biomasses végétales ainsi gérées dans des bioraffineries permettent d'obtenir du glucose et des acides gras, futures bases de monomères et de polymères.

La valorisation responsable des ressources appliquée à l'industrie papetière montre que la gestion de la ressource fibreuse profite pleinement de la diversité de la forêt française, des choix stratégiques d'implantation industrielle au sein des régions forestières et de

l'encouragement des démarches d'écocertification des producteurs. De même, comme l'a exposé Madame Bortolotti, Responsable support de Norske Skog Golbey, la collecte des papiers récupérés, la mutualisation de moyens inter-entreprises, la variété des sources d'approvisionnement et la valorisation énergétique de plus de 99% des déchets permettent un schéma d'économie circulaire avec une limitation de la consommation d'énergie et de l'empreinte carbone. Le processus papetier nécessite 99% d'eau pour 1% de fibres en entrée de machine à papier. C'est pourquoi, la recirculation de l'eau dans le processus, la gestion des effluents, le contrôle de la qualité des rejets sont primordiaux dans la pérennité et la qualité du processus global de production. Il est important de garder à l'esprit que la biomasse cellulosique qui représente environ cent milliards

de tonnes est donc probablement le pétrole de la chimie de demain et la source de nouveaux matériaux. Ainsi que l'a rappelé Jacques Khelif, Directeur du Développement Durable de Rhodia, le développement durable est un vecteur de renouveau qui renforce les liens entre producteurs et donneurs d'ordre. Les problématiques auxquelles nous sommes confrontés sont des éléments sources de créativité et d'innovation ouvrant des territoires d'avenir aux entreprises. En conclusion de cette journée, Madame Sylvie Bénard, Directrice Environnement du groupe LVMH, a présenté des exemples de réalisation initiés par différentes marques du groupe et a insisté sur les nouvelles règles à instaurer pour mieux préparer l'avenir en sécurisant les flux, en respectant les nouvelles exigences, en favorisant le partage de valeur et en faisant naître une nouvelle créativité.

Matières premières biosourcées

Exemples de débouchés possibles

Huiles et corps gras	Cosmétiques, détergents, biolubrifiants, biocarburants
Cellulose, amidon, lignine, chitine	Biopolymères
Tanins, polyphénols	Résines époxy, adhésifs
Substituts végétaux des intermédiaires pétroliers	Solvants, plastifiants, fibres, peinture

Frédéric Bonté, Ph. D.

Responsable Communication Scientifique

Contact : fredericbonte@research.lvmh-pc.com

Fondé en 1980, LVMH Recherche est un Groupement d'Intérêt Économique (G.I.E.) dont les membres sont aujourd'hui Parfums Christian Dior, Guerlain, Parfums Givenchy et Fresh. Sa mission? Concevoir et développer Parfums, Dérivés Parfumants, Produits de Soin, Produits de Maquillage pour plusieurs marques du groupe LVMH (Moët Hennessy - Louis Vuitton).

LVMH Recherche en chiffres:

Plus de 1200 produits développés par an

Plus de 200 brevets

Plus de 50 communications scientifiques par an

Des équipes de recherche à St Jean de Braye, Paris, Tokyo et Shanghai.

Website : www.lvmhrecherche-symposium.com



LVMH RECHERCHE
PARFUMS & COSMETIQUES

À découvrir en kiosque et sur www.pourlascience.fr



20 pages - prix de vente : 6,95 €

Kant déplorait l'absence d'un « Newton du brin d'herbe », mais ce serait supposer que des lois simples suffiraient à rendre compte de la fantaisie du monde végétal ! Imaginez des plantes qui ont besoin du feu pour fleurir, des plantes presque carnivores, des plantes à « sang chaud »... Le monde végétal fait preuve d'une inventivité sans limite que ce dossier vous invite à découvrir.

→ Feuilletez les premières pages sur www.pourlascience.fr

Rendez-vous sur

■ POUR LA
SCIENCE.fr

Le site de référence de l'actualité scientifique internationale

■ Retrouvez gratuitement les actualités scientifiques quotidiennes.

■ Nouveau ! Écoutez nos entretiens audio ou téléchargez-les.

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

■ Consultez les archives de tous nos magazines depuis 2004.

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

■ Suivez notre actualité en direct :



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



<http://twitter.com/pourlascience>



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



À très bientôt sur www.pourlascience.fr !

L'épidémie d'obésité entre gènes et environnement

Éradiquer l'obésité ? par D. Meyre et Ph. Froguel, p. 54 • **Les perturbateurs endocriniens, acteurs silencieux de l'obésité ?** par J.-B. Fini, M.-S. Clerget-Froidevaux et B. Demeneix, p. 56 • **L'obésité dans les gènes ?** par D. Meyre et Ph. Froguel, p. 64

Si l'obésité n'est évidemment pas une maladie contagieuse, sa progression dans toutes les régions du monde est telle que le terme épidémie s'impose. En 30 ans, le nombre de cas à l'échelle mondiale a doublé. Plus inquiétant encore, non seulement la maladie touche toujours plus de personnes dans les pays à revenus élevés, mais les pays à faibles ou moyens revenus sont loin d'être épargnés : selon l'Organisation mondiale de la santé, dans les années à venir, la plupart des nouveaux cas seront répertoriés dans ces pays, principalement en milieu urbain, tandis que la dénutrition continuera de sévir dans les campagnes (voir page 54).

Pourtant, cette maladie n'est pas une fatalité. Certes, les facteurs génétiques sont pour beaucoup dans le risque de devenir obèse. Mais des études montrent qu'une alimentation saine et du sport dès le plus jeune âge peuvent changer la donne (voir page 64). Surtout, les autres facteurs de risque sont de mieux en mieux cernés : ils sont pour la plupart liés à l'environnement et au mode de vie – et devraient être évitables. En particulier, les polluants hormonaux présents dans la nourriture et l'air joueraient un rôle non négligeable dans la survenue de la maladie en déreglant, dès la vie intra-utérine, le métabolisme énergétique de l'individu (voir page 56).

D'ici une quinzaine d'années, on devrait être capable de diagnostiquer, à la naissance, le risque d'obésité et de proposer une médecine personnalisée. Mais maîtriser l'impact des facteurs environnementaux est d'ores et déjà une nécessité, vitale pour beaucoup.

Marie-Neige Cordonnier



Éradiquer l'obésité ?

David Meyre et Philippe Froguel

Aujourd'hui, on connaît suffisamment bien les causes de l'obésité pour endiguer l'épidémie. Néanmoins, il manque une volonté politique internationale forte.

En janvier dernier, les quotidiens américains se sont réjouis : selon les derniers chiffres sur l'obésité divulgués par le Centre américain des statistiques de santé, l'épidémie d'obésité adulte et infantile américaine semble s'être stabilisée depuis 2005-2006. Néanmoins, celle-ci n'est pas enrayée pour autant. Plus d'un tiers des Américains de plus de 20 ans (plus de 78 millions de personnes), et 17 pour cent des enfants et adolescents (environ 12,5 millions de personnes), sont obèses, c'est-à-dire ont un indice de masse corporelle (rapport du poids en kilogrammes au carré de la taille en mètres) supérieur à 30. Parmi eux, si la population féminine obèse reste assez stable, le nombre d'hommes obèses n'a cessé d'augmenter, tant chez les adultes (35,5 pour cent en 2009-2010 contre 27,5 en 1999-2000) que chez les enfants (18,6 pour cent contre 14). Surtout, les cas d'adultes atteints d'obésité extrême – caractérisés par un indice de masse corporelle supérieur à 40 – sont en progression rapide : selon une étude récente de la RAND Corporation, une institution américaine à but non lucratif, ils ont augmenté de 70 pour cent entre 2000 et 2010, représentant 6,6 pour cent de la population en 2010, soit 15 millions de personnes.

Le cas des États-Unis n'est pas isolé. À l'échelle mondiale, selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS), le nombre de personnes obèses a doublé depuis 1980 : en 2008, 1,4 milliard des plus de 20 ans étaient en surpoids (indice de masse corporelle supérieur à 25), parmi lesquels plus de 200 millions d'hommes et près de 300 millions de femmes étaient obèses ; et en 2010, près de 43 mil-

■ EN CHIFFRES

2,8 millions

de personnes meurent chaque année d'une pathologie liée à l'obésité.

0,4 kg/m²

C'est l'augmentation de l'indice de masse corporelle moyen dans le monde par décennie depuis 1980. Dans certaines régions comme l'Océanie, l'augmentation par décennie dépasse 2 kg/m².

6,5 millions

de personnes étaient obèses en France en 2009, parmi lesquelles on estime à 2,9 millions le nombre de cas apparus depuis 1997.

60% de la population européenne sera obèse en 2050.

155 milliards d'euros sont dépensés par an aux États-Unis en frais médicaux liés à l'obésité.

lions d'enfants de moins de cinq ans étaient en surpoids. En outre, non seulement la prévalence de l'obésité continue d'augmenter dans la plupart des pays à revenus élevés, mais, selon l'OMS, l'essentiel des nouveaux cas seront dans les années à venir, répertoriés dans les pays à faibles ou moyens revenus notamment en Amérique centrale et du Sud, en Afrique du Sud, en Afrique du Nord et en Océanie. Ces nouveaux cas apparaissent surtout dans les villes, où le mode de vie s'occidentalise, et sont peu pris en charge par les structures de soins locales.

Une épidémie sous-estimée

Contrairement aux épidémies virales, qui mobilisent rapidement les pouvoirs publics, l'impact de l'épidémie d'obésité, qui s'est installée lentement, mais sûrement, dans toutes les régions du monde depuis 30 ans, est sous-estimé. Il est pourtant loin d'être négligeable, tant sur les populations qu'en termes de coûts, car le surpoids et l'obésité sont des facteurs de risque majeurs pour nombre de maladies chroniques telles que le diabète de type 2, les maladies cardio-vasculaires, l'arthrose, l'ostéoporose, l'insuffisance respiratoire et le cancer. Les coûts associés à l'obésité sont ainsi déjà bien supérieurs à ceux liés au tabagisme et à l'alcoolisme réunis. Sans compter l'impact social et la souffrance individuelle : nos sociétés créent des obèses, qu'elles jugent et marginalisent ensuite.

La situation n'a jamais été aussi inquiétante. Pourtant, les moyens d'endiguer l'épi-

démie n'ont jamais été aussi accessibles qu'aujourd'hui, car les causes de l'obésité sont de mieux en mieux cernées. Ces dernières sont multiples. Tout d'abord, il existe des prédispositions génétiques (voir l'article page 64). Selon une hypothèse proposée en 1962 par le généticien américain James Neel, les mutations prédisposant à l'obésité auraient même été favorisées par la sélection naturelle, au fil de l'évolution – une hypothèse confortée par plusieurs études récentes de génétique des populations. De génération en génération, des gènes permettant l'accumulation rapide des graisses auraient été favorisés – une capacité avantageuse au temps des chasseurs-cueilleurs, lorsque l'apport de nourriture, irrégulier, dépendait de la chasse, mais qui, à notre époque où la nourriture abonde, est devenue un inconvénient : l'homme mange par anticipation d'une famine qui ne survient plus depuis des siècles.

LES AUTEURS



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

Philippe FROGUEL est professeur à l'Université Lille 2 Droit et Santé où il dirige l'Unité CNRS UMR8199.

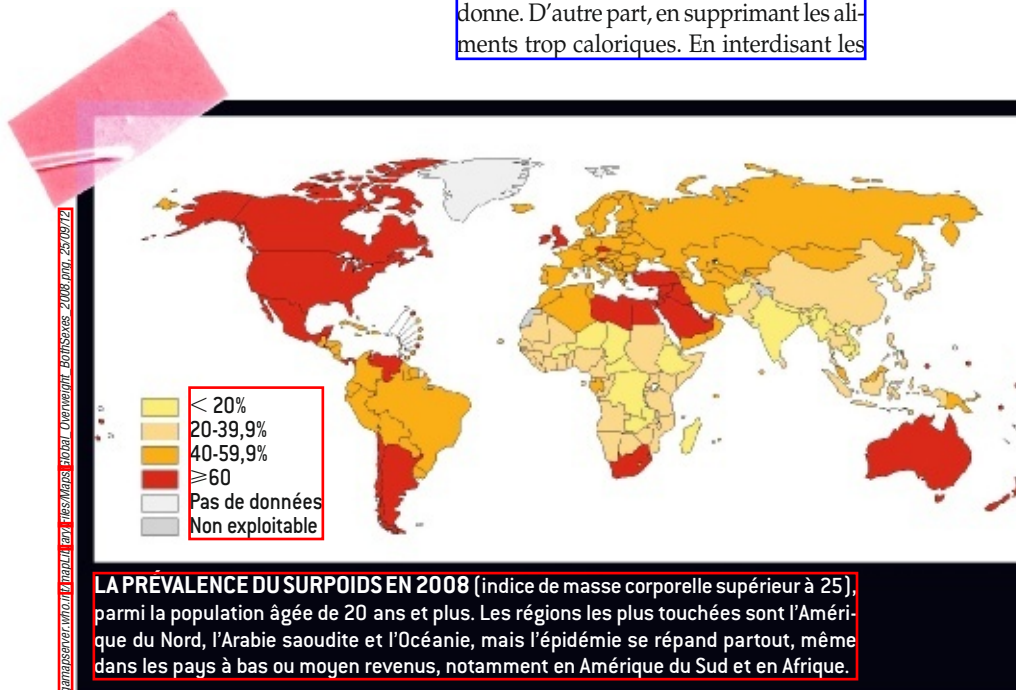
déclencheurs potentiels de mécanismes épigénétiques qui peuvent conduire à l'obésité.

Face à ce panorama inquiétant, il existe des raisons d'espérer. Toutes ces causes constituent des pistes pour prédire, prévenir et traiter la maladie. D'ici 15 ans, la génétique de l'obésité devrait permettre de déterminer qui a des prédispositions pour cette maladie avant que celle-ci ne se déclare, et de préconiser des mesures de prévention à la carte, adaptées au profil de chaque individu. Mais des mesures peuvent être prises dès maintenant à l'échelle des populations. D'une part, en matière d'éducation : la prévalence de l'obésité est plus forte parmi les populations défavorisées. Associer campagnes d'information et enseignement des principes d'une alimentation équilibrée dès le plus jeune âge pourrait changer la donne. D'autre part, en supprimant les aliments trop caloriques. En interdisant les

L'impact de l'environnement

Ensuite, divers facteurs environnementaux peuvent déséquilibrer le métabolisme énergétique de l'organisme de façon chronique. Les plus connus sont l'accès facilité à une alimentation riche en sucre et en graisse et la diminution de l'activité physique, mais d'autres facteurs ont été récemment proposés : les effets secondaires de certains médicaments, notamment certains psychotropes et antidépresseurs ; les perturbateurs endocriniens, des molécules qui bloquent ou imitent le fonctionnement des hormones (voir l'article page 56) ; les infections, l'effet obésogène de plusieurs microbes ayant été montré dans des modèles expérimentaux ; l'âge tardif de la maternité (pour l'enfant) ; la diminution du temps de sommeil ; l'utilisation de l'air conditionné qui, en maintenant l'organisme au frais quand il fait chaud, dérègle son métabolisme ; le stress entraînerait aussi une prise de poids, mais seulement chez certaines personnes.

Plus inattendu, la composition de notre flore intestinale bactérienne jouerait un rôle dans la prédisposition à l'obésité. Enfin, l'épigénétique est aussi impliquée. Il s'agit de mécanismes moléculaires qui modifient l'expression des gènes sans changer la séquence de l'ADN. Ces modifications traduisent l'influence de l'environnement, en particulier pendant la vie intra-utérine : l'alimentation de la mère, une possible obésité, des polluants ambiants, sont autant de



BIBLIOGRAPHIE

R. Sturm et A. Hatton, Morbid obesity rates continue to rise rapidly in the United States, *IJO*, doi : 10.1038/ijo.2012.159, 2012.

M. M. Finucane et al., National, regional, and global trends in body-mass index since 1980, *Lancet*, vol. 377, pp. 557-567, 2011.

E. J. Mc Allister et al., Ten putative contributors to the obesity epidemic, *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 49, n° 10, pp. 868-913, 2009.

sodas (un verre de soda contient l'équivalent de six morceaux de sucre) et en proposant des repas équilibrés gratuits dans les écoles, en diminuant le prix des aliments bons pour la santé et en encourageant l'activité physique, le gouvernement finlandais a quasiment stoppé l'augmentation de la prévalence de l'obésité sur son territoire. Pourquoi ne pas faire de même partout ?

Le principal obstacle réside dans le poids économique des industries agro-alimentaires et la pression qu'elles exercent sur les pouvoirs politiques. Mais les Finlandais semblent y être parvenus. Alors, il est temps qu'une réelle politique volontariste soit mise en place à l'échelle internationale. ■

Les perturbateurs acteurs silencieux

Les polluants hormonaux présents dans l'environnement seraient une des causes de l'épidémie mondiale d'obésité. Ils agiraient de multiples façons sur le métabolisme, et ce, dès le stade fœtal.

J.-B. Fini, M.-S. Clerget-Froidevaux et B. Demeneix

Depuis une trentaine d'années, la proportion de personnes obèses ou en surpoids augmente dans les pays industrialisés. Selon les données 2009 de l'enquête nationale ObePi sur le surpoids et l'obésité, 46,4 pour cent des Français sont soit en surpoids (leur indice de masse corporelle, c'est-à-dire le rapport du poids en kilogrammes et du carré de la taille en mètres, est compris entre 25 et 29,9), soit obèses (indice de masse corporelle supérieur à 30). Cela représente une augmentation relative de 5,9 pour cent par an depuis 12 ans. Or l'obésité est souvent associée à d'autres maladies, telles l'athérosclérose ou le diabète. De fait, on constate une forte augmentation des maladies métaboliques tel le diabète, dont la fréquence a presque doublé entre 2000 et 2008. Parmi les cas de diabètes répertoriés, 90 pour cent sont de type 2 et sont souvent associés à une obésité ou à un surpoids. Aujourd'hui, ce phénomène est devenu un enjeu de santé publique.

Jusqu'à présent, la prise de poids était surtout attribuée à un manque d'activité et à une alimentation trop riche. Néanmoins, les campagnes publiques de prévention (Plan national nutrition santé) pour une meilleure nutrition et une augmentation de l'activité physique n'ont pas enrayer cet accroissement. Ces causes ne sem-

blent donc pas expliquer à elles seules l'épidémie observée dans les pays industrialisés. Depuis quelques années, une autre hypothèse s'impose : des molécules naturelles ou de synthèse présentes dans la nourriture ou l'environnement perturbent les mécanismes de régulation du métabolisme, de l'appétit et de la satiété en modifiant le fonctionnement de certaines hormones. En particulier, ces perturbateurs endocriniens agiraient lors du développement fœtal, déréglant alors pour la vie la balance énergétique de l'individu, c'est-à-dire l'équilibre entre apports et dépenses énergétiques, et favorisant l'obésité. Quelles sont ces molécules ? Comment la perturbation hormonale influe-t-elle sur la régulation énergétique ? Quelles sont les conséquences observées sur la prévalence de l'obésité ? Telles sont les questions explorées aujourd'hui.

Un métabolisme sous contrôle hormonal

Le concept de perturbation endocrinienne est apparu il y a 20 ans et, avec lui, l'idée qu'une molécule exogène (étrangère à l'organisme) peut prendre la place d'une hormone et engendrer des effets délétères pour la santé. Ces perturbateurs endocriniens soit empêchent l'action normale de

l'hormone – de façon directe ou indirecte –, soit l'imitent.

Les hormones interviennent dans de multiples processus biologiques, notamment dans la régulation du métabolisme, la croissance, la prolifération et la différenciation des cellules et des tissus. Ces nombreux rôles représentent autant de voies pouvant être la cible de perturbateurs. Les hormones agissent à des moments précis et ce, dès le développement *in utero*. Dès lors, un perturbateur peut enclencher des cascades de signalisation intervenant au mauvais moment. Outre les conséquences directes susceptibles de perturber le développement, une exposition *in utero* peut conduire à des changements permanents, silencieux, qui ne se manifesteront qu'à l'âge adulte.

Un exemple de ces effets à long terme est celui du diéthylstilbestrol. Commercialisé sous le nom de distilbène, ce médicament a été largement prescrit dans les années 1960 aux États-Unis et 1970 en France pour prévenir (inefficacement) les fausses couches. Il a engendré, chez les filles nées de mères traitées, des cancers du vagin rares chez les adolescentes, ainsi que des troubles de la fertilité aussi bien chez les filles que chez les garçons. La troisième génération, celle dont les grands-mères ont été exposées au distilbène durant leur grossesse, pré-

endocrinien de l'obésité ?

1. L'OBESITÉ est une maladie qui touche de plus en plus de personnes. Même celles qui ne mangent pas d'aliments trop gras ou trop sucrés sont parfois en surpoids. Quelle en est la cause ? Les perturbateurs endocriniens sont sur la sellette.



sente également diverses anomalies. Ces effets transgénérationnels sont attribués à l'exposition *in utero* au distilbène, qui imite l'hormone féminine estradiol (l'empreinte transgénérationnelle implique probablement des mécanismes épigénétiques, nous y reviendrons). Tous les types de signalisations hormonales peuvent donc, en théorie, être perturbés par des molécules de l'environnement.

C'est la cas pour l'équilibre métabolique, contrôlé par de nombreuses hormones. Le corps humain a la capacité de stocker l'énergie fournie par les aliments sous forme de graisse dans des cellules dites adipeuses, les adipocytes, situées principalement sous la peau et autour de l'appareil digestif, et de réutiliser cette énergie en cas de besoin. Les hormones interviennent à de multiples étapes dans ce processus.

La ghréline est produite dans l'estomac lorsqu'il n'est plus distendu, et déclenche une sensation de faim qui provoque une prise alimentaire. À l'inverse, dans le tissu adipeux, la leptine est sécrétée quand on mange. Première réserve d'énergie de l'organisme, le tissu adipeux est en effet une glande produisant plusieurs dizaines d'hormones nommées adipokines,

L'ESSENTIEL

■ Les perturbateurs endocriniens sont des molécules de l'environnement qui bloquent l'action des hormones ou les imitent.

■ On s'interroge aujourd'hui sur leur rôle dans l'épidémie d'obésité.

■ Les multiples étapes de régulation du métabolisme énergétique où interviennent les hormones sont autant de cibles potentielles pour ces perturbateurs.

SCIENCE

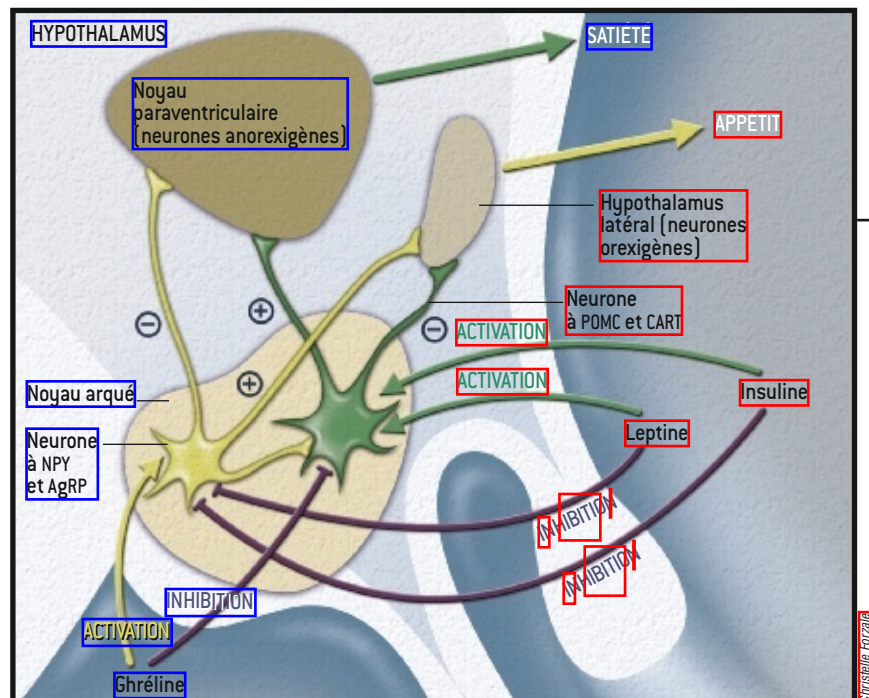
dont la leptine, qui contribuent à la régulation de la masse grasse. En excès à la fin du repas, la leptine entraîne la satiété et le signal de la fin de l'apport alimentaire. L'insuline, produite dans le pancréas, provoque aussi la satiété lorsque la concentration de sucre dans le sang dépasse un certain seuil. En cas de besoin énergétique (lors d'une activité physique prolongée, par exemple), d'autres hormones envoient des signaux au foie et au tissu adipeux, qui déclenchent la transformation du sucre et de graisse en énergie (voir l'encadré page ci-contre).

Toutes ces hormones sont véhiculées dans le sang jusqu'au cerveau, où elles traversent la barrière hémato-encéphalique, une barrière physiologique qui protège le cerveau des agents pathogènes en le séparant du sang, et régule les échanges entre le sang et le cerveau. Les hormones atteignent l'hypothalamus, la région du cerveau qui coordonne l'activité endocrinienne (la régulation de la sécrétion des hormones) et la régulation du métabolisme énergétique. C'est dans certains centres de l'hypothalamus – nommés noyaux – que ces hormones activent les neurones qui stimulent la prise alimentaire ou la satiété, mais aussi le stockage ou l'utilisation des réserves énergétiques.

En outre, nous y reviendrons, d'autres voies hormonales, commandées elles aussi par l'hypothalamus, agissent sur l'équilibre énergétique : les hormones sexuelles produites par les organes reproducteurs, les glucocorticoïdes des glandes surrénales ou les hormones thyroïdiennes influent sur le métabolisme du tissu adipeux.

Des molécules favorisant l'obésité

En 2002, Paula Baillie-Hamilton, de l'Université de Stirling, en Écosse, avançait l'hypothèse que l'épidémie d'obésité pourrait être expliquée par l'exposition à des molécules dites obésogènes. Ces composés favoriseraient l'obésité par différents mécanismes : augmentation du nombre de cellules graisseuses, modification de l'équilibre énergétique (quantités stockées *versus* utilisées), altération des mécanismes de régulation de l'appétit et de la satiété. En 2006, Bruce Blumberg, de l'Université de Californie à Irvine, aux États-Unis, proposa à son tour qu'un sous-ensemble des perturbateurs endocriniens favorise le développement de l'obésité. Bien que controver-



Glossaire

■ HOMÉOSTASIE ÉNERGÉTIQUE

C'est l'équilibre énergétique stable que maintient l'hypothalamus en régulant le métabolisme.

■ RÉCEPTEURS NUCLEAIRES

Ces protéines du noyau cellulaire sont activées par certaines hormones. Elles se lient à des séquences d'ADN spécifiques qui régulent la transcription des gènes qu'elles contrôlent.

■ NEUROPEPTIDES

Ces petites molécules sont libérées par des neurones en réponse à des signaux spécifiques.

■ XÉNOBIOTIQUE

Toute substance exogène biologiquement active, c'est-à-dire qui influe sur un mécanisme biologique.

■ SYNDROME MÉTABOLIQUE

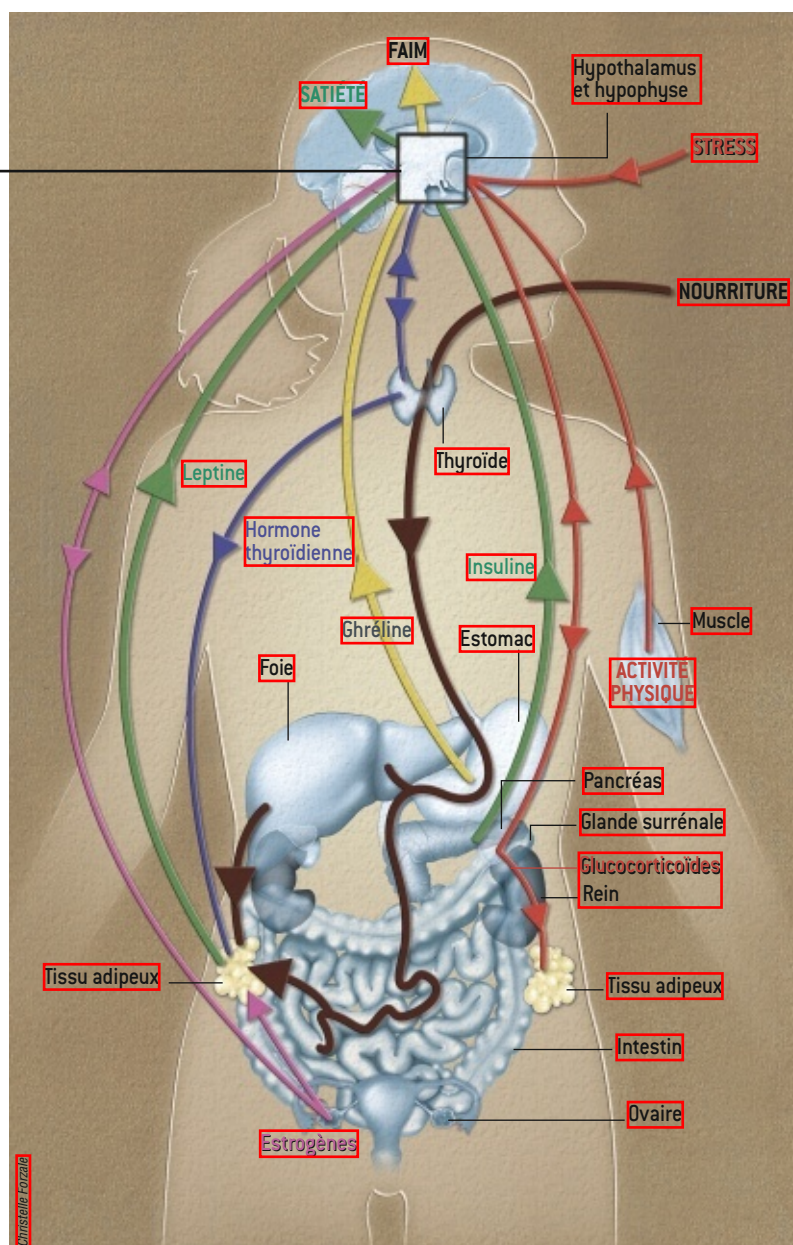
Un ensemble de symptômes accompagnant parfois l'obésité : pression artérielle et cholestérol élevés, résistance à l'insuline.

sée alors, cette hypothèse a pris de l'ampleur plus récemment grâce à l'identification de produits chimiques favorisant le développement de cellules adipeuses – l'adipogenèse – et l'obésité, chez les animaux comme chez les humains.

Habituellement, l'adipogenèse est déclenchée lorsque la quantité d'acides gras fournis par l'alimentation dépasse les capacités de stockage du tissu adipeux existant. Chaque adipocyte accumule les acides gras (reçus par le sang) dans une poche (vésicule lipidique) qui grossit en conséquence ; quand les adipocytes atteignent leur taille maximale, ils envoient des signaux qui déclenchent la différenciation de cellules souches en adipocytes. Certains produits chimiques perturbent cet équilibre en provoquant l'adipogenèse et augmentent ainsi la capacité de stockage des graisses, donc le risque d'obésité. En particulier, les médicaments antidiabétiques thiazolidinedione (aussi nommés glitazones) et la plupart des antidépresseurs ont montré de tels effets. La prise de ces médicaments ayant été associée à l'obésité chez les humains, il est légitime de supposer que l'exposition à des perturbateurs endocriniens ciblant les mêmes voies produit des résultats similaires.

De fait, plusieurs polluants chimiques activant le même récepteur que les glitazones ont été associés à une augmentation de l'adipogenèse. Les glitazones augmentent la sensibilité à l'insuline en modifiant

LA RÉGULATION DU MÉTABOLISME



De nombreuses voies hormonales participent à la régulation du métabolisme. La ghréline est produite dans l'estomac lorsqu'il n'est plus distendu ; elle déclenche, via l'hypothalamus, une sensation de faim et une prise alimentaire (en jaune). Avec l'aide du foie, le tissu adipeux reconstitue les stocks d'acides gras à partir de la nourriture ingérée, ce qui déclenche la production de leptine. En excès à la fin du repas, la leptine entraîne une sensation de satiété, de même que l'insuline produite dans le pancréas en cas de surabondance de sucre dans le sang (en vert). Dans l'hypothalamus (cartouche page ci-contre), ces hormones activent des neurones spécifiques du noyau arqué et en inhibent d'autres. Selon les signaux reçus, ces neurones activent ceux du noyau paraventriculaire, qui entraînent la satiété, ou ceux de l'hypothalamus latéral, qui stimulent l'appétit, en libérant des neuropeptides spécifiques (NPY, AgRP, POMC, CART...).

D'autres hormones, toutes produites dans des glandes contrôlées par l'hypothalamus (lui-même recevant des signaux de rétrocontrôle issus de ces glandes), agissent sur le tissu adipeux : les hormones sexuelles (ici les estrogènes synthétisés dans les ovaires chez la femme, en rose, ou la testostérone produite dans les testicules chez l'homme), les glucocorticoïdes, sécrétés par les glandes surrénales lors d'un stress ou d'une activité physique (en rouge), et les hormones thyroïdiennes (en bleu).

l'expression de gènes impliqués dans l'adipogenèse. Leur mode d'action passe par l'activation d'un récepteur nucléaire présent dans les adipocytes nommé PPAR γ , un facteur de transcription clé dans la régulation de ces gènes. Activé en temps normal par les acides gras, le récepteur PPAR γ forme un complexe avec un autre récepteur nucléaire, RXR (récepteur à l'acide 9-cis rétinolique), qui déclenche la transcription génétique, laquelle conduit à l'adipogenèse. Or la leptine régule l'expression de ces récepteurs qui eux-mêmes activent la production d'adipokines. Autant de cibles potentielles pour les perturbateurs endocriniens.

Plusieurs études montrent que le tributyl-étain (TBT), un composé (désormais interdit) utilisé dans les peintures des coques de bateaux, pour traiter le bois ou désinfecter les textiles, se lie aux récepteurs PPAR γ et RXR. L'étude cristallographique du complexe formé par le TBT et RXR révèle en outre que leur liaison est covalente, ce qui signifie qu'une fois fixé, ce produit ne se dissocie pas facilement. Selon une étude de B. Blumberg et ses collègues, des souris exposées *in utero* au TBT présentent une prédisposition accrue à la surabondance d'adipocytes. Ce composé s'accumule dans les sédiments et dans les organismes marins, notamment les poissons et mollusques consommés par l'homme.

La poche de liaison du ligand du PPAR γ est grande et peut accueillir des structures chimiques variées. Il est fort probable que d'autres substances exogènes biologiquement actives – d'autres xénobiotiques – activant le récepteur PPAR γ contribuent à l'étiologie de l'obésité. Le tétrabromobisphénol A (TBBPA), utilisé pour éviter la prise de feu rapide, est retrouvé dans de nombreux produits de consommation tels que les circuits imprimés des téléphones ou ordinateurs. Comme le TBT, il se lie au PPAR γ , devenant aussi un obésogène potentiel.

Les phtalates sont des produits chimiques organiques omniprésents utilisés pour assouplir et allonger la durée de vie des plastiques ; les chlorures de polyvinyle (PVC), notamment, sont utilisés entre autres dans le matériel médical, des matériaux de construction et les objets de puériculture (avant leur interdiction pour ce dernier usage, en 1999 en France). Or certains phtalates sont des agonistes de PPAR γ – ils se lient à ce récepteur et l'activent – et stimulent la prolifération des adipocytes en culture cellulaire. De plus, la présence

	PERTURBATEURS ENDOCRINIENS	TYPE	VOIES PERTURBÉES	EFFET <i>IN VITRO</i> OU CHEZ L'ANIMAL	MALADIES ASSOCIÉES
Composés organiques non persistants	Bisphénol A	Plastifiant	Voie des hormones sexuelles, voie thyroïdienne, axe du stress	Adipogenèse, augmentation du taux d'insuline	Diabète et anomalies hépatiques
	Phtalates (ex : DEHP)	Plastifiants	Adipogenèse et axe du stress	Adipogenèse en culture, diminution du poids chez la souris	Obésité et résistance à l'insuline
	Organochlorines (ex : DDE)"	Pesticides	Voie des hormones sexuelles	□	Syndrome métabolique et diabète
Polluants organiques persistants	Retardateurs de flamme bromés (ex : TBBPA)	Produits chimiques utilisés dans les plastiques, textiles et équipements électroménagers	Voie des hormones sexuelles, voie thyroïdienne	Augmentation de la lipolyse, diminution de la glycolyse et blocage des hormones thyroïdiennes	Syndrome métabolique et diabète
	Pesticides (ex : PCB)	Polluants industriels se retrouvant dans la nourriture	Adipogenèse et voie des hormones sexuelles	Obésité chez les souris	Syndrome métabolique, obésité et diabète
	Dioxines (ex : TCDD)	Polluants industriels se retrouvant dans la nourriture	Adipogenèse et voie des hormones sexuelles	Inhibition de l'adipogenèse	Diabète
	Perfluoropentanes (ex : PFOA, PFOS)	Anti-adhésifs	Voie des hormones sexuelles et voie thyroïdienne	Perte de poids, anorexie	Augmentation du taux de cholestérol
	Organotines (ex : TBT)	Polluants industriels se retrouvant dans la nourriture	Adipogenèse	Induction de l'adipogenèse	□

2. LES PRINCIPALES CLASSES DE PERTURBATEURS ENDOCRINIENS et leurs effets sur le métabolisme.

dans le sang des produits de dégradation de certains phtalates a été corrélée à une augmentation du tour de taille chez les hommes, et ces molécules sont désormais considérées comme des obésogènes potentiels.

L'hypothalamus, centre intégrateur du métabolisme

Ainsi, la liaison de xénobiotiques au récepteur PPAR γ expliquerait une partie des effets observés sur le stockage des graisses. Toutefois, l'excès de ce stockage n'est pas la seule caractéristique de l'obésité. Pourquoi, chez une personne obèse, la sensation de faim est-elle différente, et pourquoi la prise de poids dépend-elle de l'âge et du sexe de l'individu ? La réponse se situe principalement dans le cerveau.

Parmi les régions du système nerveux central impliquées dans le métabolisme, l'hypothalamus est aujourd'hui considéré comme le chef d'orchestre, capable d'intégrer de multiples informations métaboliques issues des différentes régions

de l'organisme, et d'agir en conséquence sur la régulation de l'équilibre énergétique. En 1940, il a été montré que des lésions de l'hypothalamus entraînent une obésité chez le rat. Ces observations ont été confirmées chez l'homme, avec la description du cas d'une femme présentant une lésion du noyau ventro-médian de l'hypothalamus : cette lésion stimulait la prise alimentaire, entraînant une obésité morbide. Au contraire, des lésions chez le rat d'un autre noyau, l'hypothalamus latéral, provoquaient une anorexie. À partir de ces observations s'est développée l'idée que les noyaux de l'hypothalamus contrôlent l'équilibre énergétique en étant influencés par des signaux périphériques.

Les travaux récents sur la régulation de l'équilibre énergétique montrent que le noyau arqué de l'hypothalamus fonctionne comme un détecteur de signaux métaboliques convoyés par le sang – des hormones telles la leptine, l'insuline et la ghréline, ainsi que des nutriments (glucose, acides gras...). Ainsi, l'hypothalamus fait le lien entre les informations sur le statut métabolique de l'organisme, et

les systèmes neuronaux et hormonaux qui assurent l'équilibre entre les apports d'énergie et sa consommation. Par ce biais, il maintient un état énergétique stable – une homéostasie énergétique – *via* des régulations fines des différents axes hormonaux. En outre, l'hypothalamus reçoit des signaux (afférences) neuronaux qui rendent compte, par exemple, de l'activité du tractus gastro-intestinal, telle la distension de l'estomac en fin de repas, et contribuent ainsi à la régulation de la balance énergétique. L'hypothalamus intègre ces multiples signaux afférents et produit en conséquence des neuropeptides qui stimulent la faim ou, au contraire, déclenchent une sensation de satiété.

À côté de cette voie directe de régulation métabolique, d'autres axes de production hormonale régulés par l'hypothalamus sont eux aussi impliqués dans le maintien de la balance énergétique. L'axe du stress, activé par un stress extérieur, entraîne chez nombre de personnes une prise alimentaire et, par conséquent, une balance énergétique positive. L'axe thyroïdien régule de nombreux processus dans l'organisme,

notamment le métabolisme. L'axe somatotrope, qui régule la croissance de l'organisme par la production d'hormones de croissance, active la consommation des stocks de graisse (la lipolyse) et la croissance musculaire. Enfin, la stimulation, principalement à la puberté, de l'axe gonadotrope, qui régit la production des hormones sexuelles, entraîne une perte de poids (balance énergétique négative) chez la femme, et une augmentation du rapport muscle/tissu adipeux chez l'homme.

Tous ces axes fonctionnent de façon similaire : l'hypothalamus envoie un signal hormonal vers l'hypophyse, une glande endocrine attenante qui, en réponse, stimule la synthèse d'hormones par la glande surrénale, ou la thyroïde, ou les gonades, etc. Ces hormones, d'une part, effectuent un rétrocontrôle sur l'hypothalamus et, d'autre part, circulent dans le sang jusqu'à leurs tissus cibles, où elles activent, de façon directe ou indirecte, un récepteur nucléaire spécifique qui déclenche la transcription d'un ou plusieurs gènes.

La voie des hormones thyroïdiennes

Le maintien de l'homéostasie énergétique repose ainsi sur des ajustements constants des signaux métaboliques et sur une communication harmonieuse entre le cerveau et la périphérie, fondée sur les neurotransmetteurs, des boucles de rétrocontrôle et sur l'expression des neuropeptides. Le moindre grain de sable qui viendrait gripper cette machine complexe aurait des conséquences immédiates ou différées sur le maintien de l'équilibre énergétique. Voici quelques exemples de perturbations de ces axes et de leurs conséquences métaboliques.

Les hormones thyroïdiennes sont produites par la glande thyroïde, sous contrôle de l'hypothalamus et de l'hypophyse. Le lien entre métabolisme énergétique et hormones thyroïdiennes est bien décrit. Les personnes hyperthyroïdiennes, qui produisent trop de ces hormones, ont une dépense énergétique accrue, ce qui entraîne une perte de poids. À l'inverse, les personnes hypothyroïdiennes présentent un métabolisme ralenti, souvent associé à un surpoids. Devant ces faits, des extraits de thyroïde ont été prescrits (à tort) dans les années 1980 comme régime amaigrissant : ils ont entraîné des effets secondaires cardiaques parfois mortels dus à

l'implication des hormones thyroïdiennes dans de nombreuses autres régulations physiologiques.

Des molécules qui altèrent la signalisation thyroïdienne peuvent augmenter le risque de diabète ou d'obésité (liée ou non au diabète). Ainsi, l'exposition à des polychlorobiphényles (PCB, bannis dans les années 1970, mais toujours utilisés dans certains pesticides) est associée à une modification des concentrations d'hormones thyroïdiennes dans le sang et à un risque de diabète accru. De même, bien que l'exposition aux perfluoropentanes (PFOA, PFOS, utilisés comme agent anti-adhésif dans les ustensiles de cuisine ou traitement imperméabilisant dans l'industrie textile) n'ait pas été associée à une augmentation de l'incidence de diabète de type 2, des études récentes montrent qu'une exposition *in utero* au PFOA entraîne l'obésité des souriceaux. Les perfluoropentanes modifient aussi les concentrations et les actions des hormones thyroïdiennes dans des modèles animaux.

Comment agissent ces molécules ? Contrairement à la poche de liaison du récepteur nucléaire PPAR γ , celle du récepteur nucléaire des hormones thyroïdiennes est très spécifique. La probabilité pour que la perturbation ait lieu sur ce récepteur est donc faible. Pourtant, il existe plus de produits chimiques identifiés comme perturbant l'homéostasie thyroïdienne que sur n'importe quelle autre voie endocrinienne. Les récepteurs thyroïdiens partagent le même partenaire que PPAR γ , la molécule RXR. Des molécules se liant à RXR pourraient perturber la signalisation thyroïdienne. Mais les xénobiotiques peuvent agir à bien d'autres strates de l'axe thyroïdien : sur la production des hormones par la glande thyroïde, le long du transport sanguin ou dans le processus d'élimination des surplus d'hormones. Ces mécanismes restent pour la plupart à étudier (voir l'encadré page 62).

Les hormones sexuelles – ou stéroïdes – sont produites principalement par les gonades, sous contrôle hypothalamique. Le lien entre stéroïdes et prise de poids est également assez bien décrit. Par exemple, contrairement aux effets observés chez l'adulte, l'exposition périnatale à un excès d'estrogènes entraîne une prise de poids pendant la vie adulte. Des souris gestantes traitées pendant la période néonatale avec le distilbène ont donné naissance à des souriceaux plus

LES AUTEURS

Jean-Baptiste FINI, post-doctorant, Marie-Stéphanie CLERGET-FROIDEVAUX, maître de conférence, et Barbara DEMENEIX, professeur, travaillent dans l'UMR CNRS/MNHN 7221 Évolution des régulations endocriniennes, au Muséum national d'histoire naturelle à Paris.

BIBLIOGRAPHIE

A. Janesick et B. Blumberg, *Obesogens, stem cells and the developmental programming of obesity*, *International Journal of Andrology*, vol. 35, n° 3, pp. 437-448, 2012.

S. Decherf et B. A. Demeneix, *The obesogen hypothesis : A shift of focus from the periphery to the hypothalamus*, *J. Toxicol. Environ. Health B Crit. Rev.*, vol. 14[5-7], pp. 423-428, 2011.

C. Casals-Casas et B. Desvergne, *Endocrine disruptors : From endocrine to metabolic disruption*, *Annu. Rev. Physiol.*, vol. 73, pp. 135-162, 2011.

M. Tohmé et al., *Des polluants hormonaux*, *Pour la Science*, n° 396, pp. 32-40, 2010.

H. Patisaul, *Le bisphénol A : un danger pour la santé ?*, *Pour la Science*, n° 396, pp. 42-49, 2010.

L. Trasande et al., *Association between urinary bisphenol A concentration and obesity prevalence in children and adolescents*, *JAMA*, vol. 308, pp. 1113-1121, 2012.

petits et de plus faible poids, mais qui ont développé un surpoids plus tard. Ce médicament fut d'ailleurs utilisé pendant la Seconde Guerre mondiale pour engraisser les vaches et les poulets à moindre coût...

Le dichlorodiphényl-dichloroéthylène (DDE), principal métabolite du DDT (un insecticide très utilisé après la Seconde Guerre mondiale dans l'agriculture et pour lutter contre le paludisme, voir l'article page 76), est à la fois un estrogène et un anti-androgène. Les mères qui ont vécu le long des rives du lac Michigan aux États-Unis, exposées à des concentrations élevées de DDT, ont eu jusqu'à trois fois plus

de risques d'avoir un enfant ayant un indice de masse corporelle élevé à l'âge adulte. Plus récemment, Michelle Mendez, du Centre de recherche en épidémiologie environnementale, à Barcelone en Espagne, et ses collègues ont montré que l'exposition prénatale au DDE est associée à un gain de poids rapide chez le nourrisson et à un indice de masse corporelle élevé chez l'enfant. De même, des souris ou rates gestantes traitées avec du bisphénol A, un estrogène synthétique dit de faible activité, ont donné naissance à une progéniture qui, lors de sa croissance, a développé un surpoids par rapport à celle non exposée.

Malgré un grand nombre d'études disponibles, les effets du bisphénol A sur la santé restent controversés. De récents travaux montrent chez l'homme un lien entre les concentrations de bisphénol A dans l'urine et l'obésité. Selon le moment d'exposition aux estrogènes, les conséquences varient : une exposition fœtale entraîne un surpoids, tandis qu'une exposition tardive a plutôt tendance à protéger contre l'insulino-résistance et le diabète. Actuellement, l'expérimentation animale suggère que de faibles doses d'exposition au bisphénol A durant la gestation conduisent au développement de l'obésité et au diabète de type 2. Il est probable que le bisphénol A exerce ses effets obésogènes en agissant comme un estrogène lors du développement ; néanmoins, le mécanisme d'action reste là aussi à étudier.

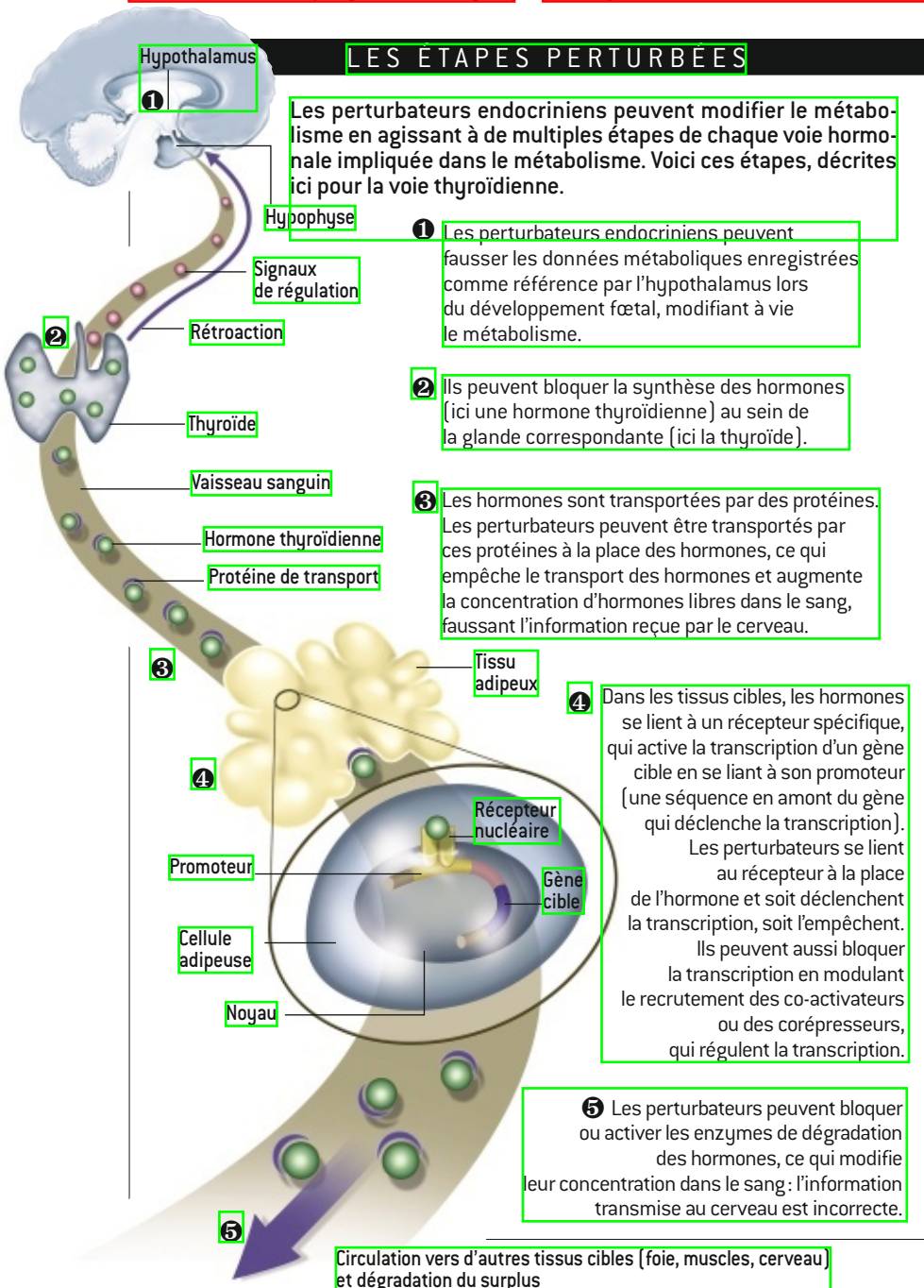
L'axe du stress

Les hormones produites lors d'un stress – les glucocorticoïdes, sécrétés par les glandes surrénales – influent aussi sur la prise de poids. Une surproduction de cortisol, le principal glucocorticoïde, est liée à l'obésité ; les glucocorticoïdes augmentent l'adipogenèse ; une exposition excessive aux glucocorticoïdes *in utero* est souvent associée à un poids de naissance faible et à un risque accru de maladies cardio-vasculaires, hypertension et diabète à l'âge adulte ; des singes dont les mères sont traitées à la dexaméthasone, un glucocorticoïde de synthèse, pendant la gestation ont un poids normal à la naissance, mais développent un surpoids à deux mois et une obésité à l'âge adulte, associée à un syndrome métabolique (pression artérielle et cholestérol élevés, résistance à l'insuline). Ainsi, la perturbation de cet axe tant au sein de l'hypothalamus pendant le développement fœtal que dans le tissu adipeux entraînerait une augmentation de l'adipogenèse. Or différentes études sur cultures cellulaires ont montré que plusieurs molécules de synthèse, telles que le bisphénol A, l'insecticide endosulfane et le fongicide vinclozoline, perturbent l'activité des récepteurs hormonaux intervenant le long de l'axe du stress.

Ainsi, les perturbateurs endocriniens peuvent agir à de multiples étapes du contrôle de l'homéostasie énergétique. De surcroît, leurs conséquences à long terme – effets à l'âge adulte après exposition *in utero*, voire sur plusieurs générations –

LES ÉTAPES PERTURBÉES

Les perturbateurs endocriniens peuvent modifier le métabolisme en agissant à de multiples étapes de chaque voie hormonale impliquée dans le métabolisme. Voici ces étapes, décrites ici pour la voie thyroïdienne.



suggèrent que les perturbations modifient durablement la régulation de l'expression génique. Comme l'a récemment montré Stéphanie Decherf au sein de notre équipe, des souris exposées *in utero* au TBT ou au TBBPA ont une activité transcriptionnelle modifiée dans l'hypothalamus. Ces expositions perturbent l'expression d'un gène clef de la régulation de la prise alimentaire (le gène codant le récepteur de type 4 de la mélanocortine), ce qui entraîne une satiété altérée (besoin de manger plus pour atteindre la satiété) et des préférences alimentaires différentes (choix d'une alimentation plus grasse ou plus sucrée).

Altération épigénétique au stade fœtal

En d'autres termes, une exposition fœtale peut entraîner des modifications irréversibles. L'organisme dispose de multiples stratégies pour retrouver un équilibre après des changements physiologiques, mais encore faut-il que le « réglage » du métabolisme mis en place lors du développement fœtal, qui restera toute la vie comme référence, soit correct. Si le niveau « normal » enregistré par l'hypothalamus est erroné, le métabolisme s'en trouve modifié à vie.

Comment les perturbateurs endocriniens dérèglent-ils le contrôle central du métabolisme ? Cela implique très probablement des modifications épigénétiques, c'est-à-dire des modifications de l'expression des gènes sans altération des séquences de l'ADN. Le degré de compacité de la molécule d'ADN varie et, avec lui, l'expression des gènes. Selon le moment de l'apparition de ces marques et le type de cellules, ces modifications sont transmissibles de la mère à l'enfant et restent silencieuses tant que la voie de signalisation n'est pas activée (lors de la puberté, par exemple) – une propriété qui caractérise le mode d'action de certains perturbateurs endocriniens.

De nombreuses études ont montré que des changements dans l'environnement nutritionnel, notamment *via* des perturbateurs endocriniens, entraînent des altérations dans le statut de méthylation de gènes, c'est-à-dire du nombre de groupes méthyle (CH_3) qu'ils portent – une forme de modification épigénétique. En particulier, l'utilisation de souris portant le gène *agouti* (un gène qui donne un poil bicolore à dominante jaune) a mis en évidence l'effet de

Comment limiter les perturbations métaboliques ?

Notre exposition aux perturbateurs endocriniens se fait par l'air, l'eau, la nourriture et la peau. Les concentrations de polluants organiques mesurées chez les ours polaires montrent qu'il est vain de penser qu'on peut vivre sans en accumuler certains. Néanmoins, nous pouvons faire quelques gestes simples à l'échelle individuelle pour limiter notre exposition à certaines classes de perturbateurs endocriniens, notamment les pesticides, les plastifiants, les retardateurs de flammes et les imperméabilisants.

Par exemple, éviter de consommer trop de nourriture ayant été en contact direct avec des em-

ballages en plastique, utiliser des matériaux dits inertes pour la préparation ou le stockage des aliments (bocaux ou biberons en verre, poêles en acier inoxydable ou en céramique) ou pour réchauffer au four à micro-ondes. Favoriser l'achat de produits issus d'une agriculture biologique. Éviter l'emploi des bombes aérosols d'imperméabilisants. Ne pas dormir à côté d'un ordinateur ou d'un téléphone portable en fonctionnement. D'une manière générale, éviter la moquette et les revêtements de sol en polychlorure de vinyle dans les chambres d'enfant et renouveler fréquemment l'air des habitations.

Éviter des cosmétiques avec des conservateurs tels que les parabènes. Laver les vêtements neufs avant de les porter. Enfin, limiter sa contribution à la contamination de l'environnement en réduisant le nombre de contenants et l'utilisation de produits ménagers non nécessaires.

À l'échelle des pouvoirs publics, plusieurs polluants ont déjà été interdits depuis parfois plusieurs années, mais persistent dans l'environnement, et d'autres font partie de notre quotidien. Il est urgent de substituer des composés plus sûrs aux substances les plus incriminées encore en circulation.

l'alimentation maternelle sur la méthylation de l'ADN : les souris dont la mère avait reçu un régime pauvre en protéines présentaient une hyperméthylation d'une séquence (un transposon) qui contrôle l'expression du gène *agouti*, et inversement. Les souris hyperméthylées étaient minces et de pelage brun, tandis que les souris hypométhylées présentaient un surpoids et un pelage jaune. D'autres études ont montré qu'une carence en acide

folique (vitamine B9), source principale de groupes méthyles *via* l'alimentation, entraîne une déméthylation du transposon, tandis qu'une alimentation riche en acide folique, en vitamine B12, en choline ou en génystéine (composant du soja) empêche le développement du phénotype obèse/pelage jaune. Et une exposition au bisphénol A a l'effet inverse, conduisant à une déméthylation du transposon ainsi qu'à l'apparition du phénotype obèse/pelage jaune. Chez l'homme, une méthylation accrue du promoteur du récepteur RXR α a été associée à une augmentation de la masse grasse des enfants à neuf ans.

IL EST PRIMORDIAL de prendre en considération le versant perturbateurs endocriniens dans les plans de lutte contre l'obésité.

folique (vitamine B9), source principale de groupes méthyles *via* l'alimentation, entraîne une déméthylation du transposon, tandis qu'une alimentation riche en acide folique, en vitamine B12, en choline ou en génystéine (composant du soja) empêche le développement du phénotype obèse/pelage jaune. Et une exposition au bisphénol A a l'effet inverse, conduisant à une déméthylation du transposon ainsi qu'à l'apparition du phénotype obèse/pelage jaune. Chez l'homme, une méthylation accrue du promoteur du récepteur RXR α a été associée à une augmentation de la masse grasse des enfants à neuf ans.

Ainsi, une perturbation des mécanismes de régulation lors de leur programmation initiale peut avoir des conséquences à vie sur le métabolisme énergétique. Les diffé-

rents axes hormonaux dépendant de l'activation hypothalamo-hypophysaire peuvent être perturbés à de multiples étapes : lors du contrôle central effectué par l'hypothalamus, mais aussi lors de la production des hormones par les glandes endocrines, lors de leur liaison à leur récepteur dans le noyau des cellules cibles ou encore lors de leur transport par le sang. De plus, des changements nutritionnels ou l'exposition prénatale peuvent entraîner des modifications épigénétiques qui perturberont le contrôle du métabolisme énergétique et de l'homéostasie des lipides, conduisant à une prise de poids, voire à une obésité.

Jusqu'à présent, les effets ont surtout été observés sur des cellules en culture ou des modèles animaux. Chez l'homme, les études, épidémiologiques, n'ont révélé que des associations entre perturbateurs endocriniens et obésité, qui ne prouvent pas l'existence d'un lien de cause à effet. Néanmoins, avec l'accumulation de tous ces résultats, la question se pose. La nourriture étant l'une des routes privilégiées d'exposition à des perturbateurs endocriniens, il est légitime de s'interroger sur les effets de ces substances sur la préprogrammation de notre devenir métabolique. De tels mécanismes expliqueraient, du moins en partie, pourquoi certaines personnes ont du mal à perdre du poids, et l'incidence accrue des maladies métaboliques. Il est donc primordial de prendre en considération le versant perturbateurs endocriniens dans les plans de lutte contre l'obésité. ■

L'obésité dans les gènes ?

David Meyre et Philippe Froguel

Entamée il y a une quinzaine d'années, la recherche des facteurs génétiques de l'obésité a permis d'identifier plus de 70 gènes dont les variations prédisposent à la maladie.

L'obésité, maladie génétique ? La question jusqu'à peu faisait sourire, tant le discours dominant désignait l'« environnement » comme un coupable idéal. Aujourd'hui, on sait que si, à l'échelle des populations, le mode de vie joue un rôle moteur dans l'épidémie actuelle d'obésité, ce sont bien nos susceptibilités individuelles – génétiques ou épigénétiques – qui déterminent notre destin pondéral et métabolique. Cela a été montré chez des dizaines de milliers de jumeaux de tous âges. Ainsi, 70 pour cent des variations de l'indice de masse corporelle (le rapport du poids en kilogrammes par le carré de la taille en mètre) sont d'origine génétique, même si l'impact des gènes peut diminuer considérablement chez ceux qui s'astreignent à une activité physique intense ou privilégient une alimentation saine.

Deux bonnes nouvelles en découlent : nous ne sommes pas tous déterminés par notre environnement à devenir obèses, car certains d'entre nous sont protégés par leur patrimoine génétique (et ne deviendront jamais obèses) ; et même si nous n'avons pas touché le bon lot de la loterie génétique, nous pouvons résister à

ces gènes et au pessimisme ambiant. Examinons l'état des connaissances sur les gènes de l'obésité et ce que celles-ci nous apprennent sur la genèse de cette maladie.

Des obésités dues à une seule mutation

Certaines formes d'obésité dites monogéniques, parfois extrêmes, sont liées à la présence d'une mutation unique sur un gène. Jusqu'à présent, huit gènes (*LEP*, *LEPR*, *MC4R*, *POMC*, *PCSK1*, *BDNF*, *NTKR2*, *SIM1*) ont été identifiés, d'abord chez la souris, puis chez l'homme, comme responsables de telles formes d'obésité : les personnes ayant une mutation sur un de ces gènes ont une forte probabilité d'être obèses. Tous ces gènes conduisent à la synthèse de protéines clés d'une voie centrale dans la régulation de la prise alimentaire et du poids : la voie de la satiété déclenchée par la production d'une hormone, la leptine, dans le tissu graisseux (adipeux).

Parmi ces formes d'obésité, seule la déficience congénitale en

leptine (qui concerne pour l'instant 33 patients dans le monde) peut être « guérie », du moins tant que des injections quotidiennes de leptine recombinante humaine sont administrées. La faim obsédante disparaît et le développement pubertaire devient normal.

Environ cinq pour cent des patients obèses ont un unique gène muté. La plupart de ces cas sont dus à une mutation du gène *MC4R* qui bloque son expression ; ce gène code le récepteur 4 des mélanocortines, des neuropeptides libérés dans l'hypothalamus lors de l'activation, par la leptine, de la voie de la satiété. Ces chiffres varient cependant de façon considérable en fonction de l'origine géographique des sujets. Nous avons par exemple montré que les obésités causées par les mutations du gène *MC4R* sont rares en Grèce, mais communes au Pakistan. Il reste probablement d'autres formes monogéniques d'obésité à identifier.

Les formes monogéniques d'obésité sont extrêmes lorsque les deux copies d'un même gène (une copie de la mère, une du père) sont

mutées. Ces cas graves sont étudiés en détail, car ils aident à repérer de nouveaux gènes impliqués dans l'obésité ; toutefois, la majorité des personnes obèses sont atteintes de formes plus modérées d'obésité qui, pour la plupart, ne sont pas monogéniques, mais polygéniques, c'est-à-dire liées à plusieurs gènes mutés. On a d'abord recherché la cause de l'obésité commune dans les gènes de modulateurs du métabolisme exprimés dans les tissus adipeux ou musculaire, avec l'idée que le déséquilibre énergétique était avant tout lié à un défaut de dépense énergétique.

Cette approche a été peu probante, jusqu'à l'étude récente du récepteur des acides gras oméga-3 GPR120. L'activation de ce récepteur stimule la production d'insuline et la sécrétion d'hormones de satiété, tel le GLP-1 (*glucagon-like peptide 1*). Il intervient aussi dans le goût pour les graisses et la production de nouvelles cellules adipeuses qui stockent les graisses. Des souris dont le gène *GPR120* est inactif développent plus souvent une obésité en présence d'une alimentation riche en graisses ; le séquençage du gène chez l'homme a permis de découvrir, chez trois pour cent de la population en Europe, une mutation qui bloque l'activité du récepteur et augmente de 60 pour cent le risque d'obésité.

Plus de 60 gènes identifiés en cinq ans

Un autre gène intéressant repéré par cette approche est *CNR1*, qui code le récepteur des cannabinoïdes endogènes, des messagers lipidiques ressemblant au cannabis. Plusieurs variants fréquents du gène (des copies mutées) prédisposent à l'obésité et au syndrome métabolique associé à l'obésité (des symptômes tels que pression artérielle et taux de cholestérol élevés, ou résistance à l'insuline), ce qui a mis en évidence l'importance de la voie des cannabinoïdes endogènes comme modulateur de l'appétit et médiateur de la « diabésité » (diabète associé à une obésité). Enfin, l'étude du gène d'obésité monogénique *MC4R* a permis d'identifier deux variants génétiques qui dopent l'activité du récepteur 4 aux mélanocortines et, par là-même, protègent les sujets portant l'une ou l'autre de ces mutations (six pour cent de la population).

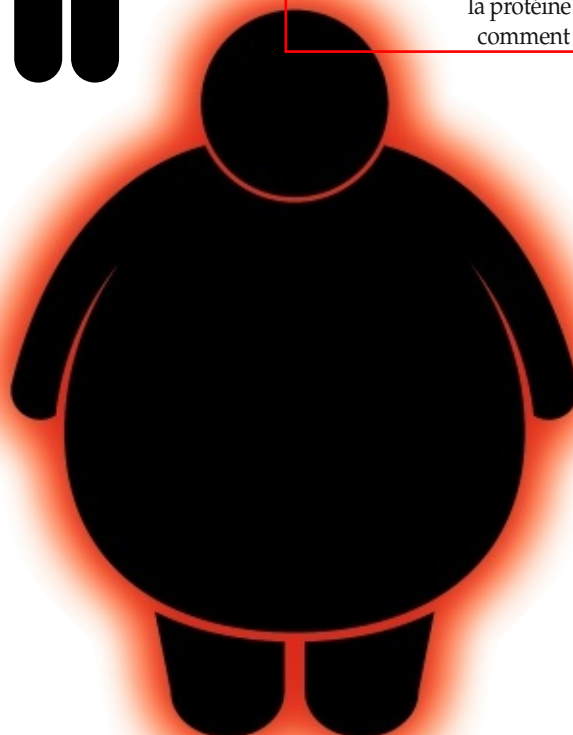
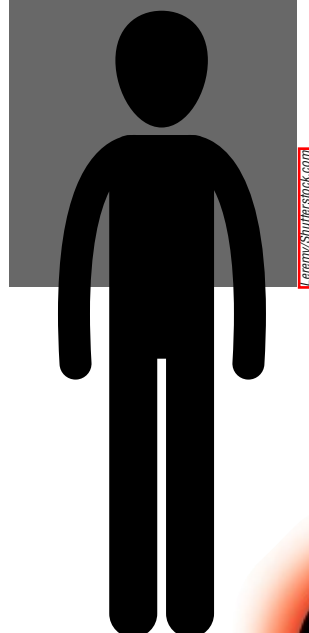
Si cette approche a donné peu de résultats, c'est en partie à cause de la multitude des gènes potentiellement impliqués et des effets modestes de chacun des gènes en cause dans les obésités polygéniques.

L'ESSENTIEL

■ Les facteurs génétiques expliqueraient 70 pour cent du risque individuel de devenir obèse.

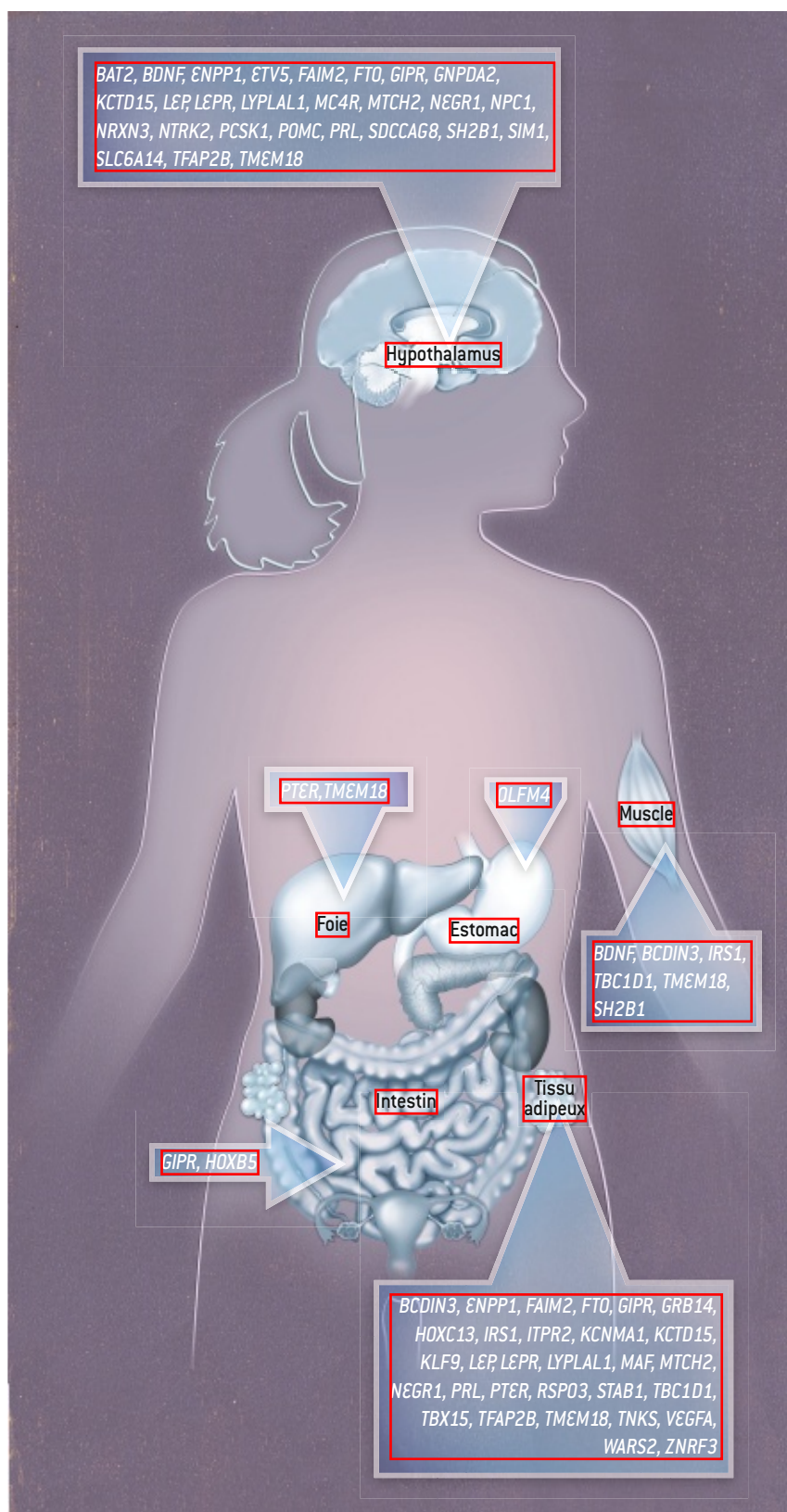
■ En comparant le génome de personnes obèses et des membres de leur famille, on découvre de nombreux gènes impliqués dans l'obésité.

■ Une alimentation saine et du sport contrebalancent la loterie génétique.



Une approche globale non biaisée de l'ensemble du génome était nécessaire. En 1998, notre première étude génomique de familles d'obèses a porté sur 700 personnes. Parmi les 400 régions polymorphes d'ADN repérées, nous avons identifié des mutations pointant la responsabilité de quatre gènes participant tous au contrôle du stock de lipides ou de l'appétit.

Tout s'est accéléré après le séquençage du génome humain en 2001 et l'identification de millions de variants fréquents de l'ADN qui expliquent en partie la diversité humaine. Et par la mise au point de puces à ADN, qui permettent aujourd'hui d'étudier en dix minutes quatre millions de polymorphismes génétiques, c'est-à-dire de séquences mutées au sein de gènes connus. En moins de cinq ans, plus de 60 gènes ou séquences impliqués dans l'obésité ont été identifiés et confirmés, avec cependant de nombreuses zones d'ombre sur la physiologie de cette maladie. Le meilleur exemple est le gène *FTO* (découvert simultanément par nous et un groupe anglais), dont on a appris en 2007 que certaines mutations augmentent de 67 pour cent le risque d'obésité (134 pour cent pour les personnes présentant ces mutations sur les deux copies du gène) et d'environ trois kilogrammes le poids des personnes non obèses. Le gène *FTO* est à ce jour celui qui prédispose le plus à l'obésité et à la prise de poids. Malgré cela, on ignore encore aujourd'hui la fonction de la protéine qu'il code et comment sa mutation



LOCALISATION DES RÉGIONS où s'expriment les gènes de prédisposition à l'obésité répertoriés à ce jour. La plupart de ces gènes contrôlent la sensation de faim ou de satiété dans le cerveau ou sont impliqués dans le développement et le maintien du tissu adipeux gras. Quelques gènes ont aussi un rôle dans l'activité du muscle squelettique, la production d'hormones contrôlant l'appétit dans l'intestin ou la protection de l'estomac face aux infections bactériennes. La fonction de beaucoup de gènes de prédisposition à l'obésité reste à découvrir.

accroît la prédisposition à l'obésité. De récents travaux ont montré un rôle dans le contrôle épigénétique (la modulation de l'expression des gènes par le milieu sans altération des séquences d'ADN) du développement et du maintien du tissu adipeux.

Entre 2009 et 2012, le nombre d'études explorant la génétique de l'indice de masse corporelle ou de l'obésité grave à l'aide des puces à ADN a augmenté exponentiellement, conduisant à la découverte de près de 40 nouveaux gènes ou séquences de susceptibilité. La plupart sont exprimés dans le cerveau et participeraient à la régulation de la satiété et aux mécanismes de stimulation de la prise alimentaire.

Les généticiens se sont ensuite demandé si des gènes favorisaient l'établissement d'un profil d'obésité de type « pomme » (les graisses s'accumulent surtout dans la région abdominale) ou « poire » (les stocks de graisses sont plus importants autour des hanches). Cette question présentait d'autant plus d'intérêt que l'accumulation excessive de graisses dans la région abdominale s'accompagne plus souvent de complications de santé telles que le diabète ou les maladies cardio-vasculaires. À l'aide de mesures de la répartition de la masse grasse (tour de taille, rapport tour de taille/tour de hanches) et de puces à ADN, 19 gènes ont été repérés, dont seulement 5 déjà connus comme prédisposant à l'obésité. La plupart de ces gènes sont impliqués dans le développement et le métabolisme du tissu adipeux gras, et l'effet de la moitié de ces gènes est amplifié chez les femmes.

La perte d'un bout de chromosome

La génomique a aussi révélé que des modifications structurales du génome prédisposent à l'obésité. Si chaque humain présente deux copies de son génome, des variations – délétion (perte d'un fragment d'ADN), duplication, translocation (déplacement), inversion – se produisent parfois. Des variations structurales du génome sont associées à diverses maladies, et l'on en trouve à présent associées à l'obésité. Notamment, deux études indépendantes ont montré qu'une délétion rare d'un fragment (16p11.2) du chromosome 16 augmente de 50 pour cent le risque d'obésité. Cette délétion, qui expliquerait 0,7 pour cent des cas d'obésité morbide, avait été auparavant associée à l'autisme, à la schizophrénie et au retard mental – des caractéristiques

téristiques retrouvées chez la plupart des individus obèses porteurs de la délétion. À l'inverse, les rares sujets (1/2000 en moyenne) présentant un nombre excessif de copies de cette même région (trois au lieu de deux) ont des difficultés à s'alimenter et un risque 20 fois plus important de développer une maigreur extrême.

La région du chromosome 16 touchée compte une trentaine de gènes, parmi lesquels le gène *SH2B1* émerge pour expliquer le phénotype d'obésité. Il code une protéine qui interagit avec un régulateur de la sensibilité à la leptine. En outre, des souris dont le gène est inactivé se nourrissent beaucoup plus, développent une résistance grave à l'insuline et présentent une surabondance de leptine – des caractéristiques que l'on retrouve chez les patients obèses porteurs de la délétion. Au contraire, la surexpression de *SH2B1* chez la souris induit une résistance à l'obésité en réponse à un régime gras. Un variant génétique dans la région de *SH2B1* a aussi été associé à l'obésité commune.

Du sport pour lutter contre son génome

Les nouvelles générations de séquenceurs à très haut débit (qui séquent les 3,5 milliards de nucléotides du génome en une semaine) permettront de faire un inventaire exhaustif de ces désordres structuraux et d'évaluer leur contribution au risque génétique d'obésité. À côté de cette approche génétique de l'obésité, les généticiens étudient si l'environnement influe sur la prédisposition à l'obésité liée aux variants génétiques répertoriés. Les résultats les plus spectaculaires concernent l'impact du sport sur la prise de poids liée à des mutations du gène *FTO* : les effets des gènes *FTO* mutés sur la prise de poids sont marqués dans un contexte de sédentarité, mais abolis par la pratique intense d'un sport, et ce aussi bien chez les adolescents que chez les adultes. Une étude récente portant sur 20 000 sujets anglais et 12 gènes de prédisposition à l'obésité a confirmé l'effet bénéfique du sport pour lutter contre la prise de poids due à des causes génétiques : chaque allèle à risque supplémentaire aboutit en moyenne à une prise de poids de 592 grammes chez les individus sédentaires contre 370 grammes seulement chez les sportifs.

Après la découverte de plus de 70 gènes ou régions associés à l'obésité, plusieurs

conclusions se dessinent. D'abord, cette pathologie est avant tout une maladie génétique du comportement alimentaire. Nous ne sommes donc pas tous égaux dans notre ressenti de la faim, les individus génétiquement programmés pour être affamés étant plus vulnérables aux sollicitations de nos sociétés modernes, caractérisées par un accès quasi illimité à la nourriture. Notre comportement alimentaire semble être influencé bien plus par des processus biologiques que par notre simple volonté, ce qui devrait conduire nos sociétés à considérer les obèses d'un regard moins accusateur.

Les récentes découvertes de la génétique mettent aussi à mal le dogme de l'obèse qui ne mange pas plus qu'un autre, mais à qui tout profite : même dans le cas extrême d'une déficience monogénique de type *MC4R*, un contrôle strict de la prise alimentaire prévient le développement de l'obésité. En outre, il n'y a pas de différence majeure d'architecture génétique entre obésité infantile et obésité adulte. Les mêmes gènes conduisent aux deux. C'est donc l'environnement qui fait la différence.

Autre fait marquant, la différence entre un individu en léger surpoids et un individu obèse morbide s'explique plus par le nombre de variants génétiques à risque accumulés que par des variants génétiques distincts. De plus, les caractéristiques de l'obésité dépendent plus de la nature du variant génétique (plus ou moins délétère, polymorphisme *versus* délétion) que de celle du gène en cause. Enfin, les effets de la pratique régulière d'une activité sportive ou d'une alimentation équilibrée sur la prise de poids sont d'autant plus bénéfiques que le patrimoine génétique est à risque.

Dans les prochaines années, la carte génétique de prédisposition à l'obésité devrait se préciser. De nouvelles voies biochimiques impliquées dans la régulation de l'appétit devraient être mises au jour. Les espoirs se concentrent sur le dépistage précoce des individus à haut risque, par des approches combinant l'information du génome, mais aussi de l'épigénome (l'ensemble des modifications épigénétiques du génome), du transcriptome (les produits de la transcription de gènes), du microbiome (les bactéries de la flore intestinale) et de l'environnement. Une médecine préventive et une prise en charge personnalisées pourront alors être mises en place pour ces sujets – voire, qui sait, de nouvelles stratégies thérapeutiques... ■

LES AUTEURS



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

Philippe FROGUEL est professeur à l'Université Lille 2 Droit et Santé où il dirige l'Unité CNRS UMR8199. Il est aussi professeur de médecine génomique au Collège impérial de Londres, en Angleterre.

BIBLIOGRAPHIE

A. Ichimura *et al.*, Dysfunction of lipid sensor GPR120 leads to obesity in both mouse and human, *Nature*, vol. 483, pp. 350-354, 2012.

S. Jacquemont *et al.*, Mirror extreme BMI phenotypes associated with gene dosage at the chromosome 16p11.2 locus, *Nature*, vol. 478, pp. 97-102, 2011.

D. Meyre *et al.*, Genome-wide association study for early-onset and morbid adult obesity identifies three new risk loci in European populations, *Nat. Genet.*, vol. 41, pp. 157-159, 2009.

A. J. Walley *et al.*, The genetic contribution to non-syndromic human obesity, *Nat. Rev. Genet.*, vol. 10, pp. 431-442, 2009.

PLAISIR

la nouvelle carte cérébrale

Morten Kringelbach et Kent Berridge

Les circuits cérébraux associés au plaisir ont été précisés. De meilleurs traitements de la dépendance et de certaines maladies mentales pourraient en découler.

Dans les années 1950, le psychiatre Robert Heath, de l'Université Tulane, aux États-Unis, lança un programme controversé : il consistait à implanter des électrodes dans le cerveau de patients atteints d'épilepsie, de schizophrénie, de dépression et d'autres maladies mentales graves. Son objectif initial était de localiser le siège biologique de ces maladies et de les guérir en stimulant artificiellement les régions cérébrales en cause.

Selon Heath, les résultats furent spectaculaires. Des patients dans un état quasi catatonique – une attitude psychomotrice parfois associée à la schizophrénie et caractérisée notamment par une passivité et une attitude négative exacerbées – ont souri, discuté et même ri. Toutefois, quand la stimulation cessait, les symptômes réapparaissaient.

Heath fournit alors à quelques malades un dispositif permettant de déclencher eux-mêmes la stimulation dès qu'ils en ressentaient le besoin. L'un d'eux, le patient

B-19, était un homosexuel âgé de 24 ans, qu'il tentait de guérir de sa dépression et de priver de son désir pour les hommes : lors d'une séance, B-19 déclencha ses électrodes quelque 1 500 fois en trois heures ! Selon Heath, cette autostimulation obsessionnelle procurait à ce patient des sensations de plaisir ; il se sentait alerte et empli de bienveillance. Le patient protesta vigoureusement contre l'arrêt des stimulations en fin de séance.

Ces expériences ont aidé à définir le « centre du plaisir », un ensemble de structures cérébrales supposé associé à cette sensation. Elles ont également engendré un grand intérêt scientifique et culturel pour les fondements biologiques du plaisir. Au cours des 30 années suivantes, les neurobiologistes ont identifié les composés chimiques que s'échangent ces régions cérébrales. Est ainsi née l'idée de mondes « idéaux » où l'activation de ces aires cérébrales produirait une « béatitude » instantanée.

L'ESSENTIEL

■ On a découvert dans

le cerveau des « points chauds hédoniques », qui accroissent le plaisir lorsqu'ils sont stimulés.

■ Ils diffèrent du circuit dit de la récompense, qui serait le médiateur du désir plus que du plaisir.

■ Un découplage

des circuits du plaisir et du désir pourrait être à l'origine de la dépendance – une idée susceptible d'inspirer de nouveaux traitements.

Grâce à la biologie moléculaire et à des techniques modernes de stimulation du cerveau profond, nous avons redéfini les circuits cérébraux du plaisir, qui sont bien plus restreints et plus complexes qu'on ne le pensait. Nous espérons ainsi ouvrir la voie à des traitements plus efficaces de la dépression, de la dépendance et d'autres troubles.

Qu'il soit ressenti comme un délicieux frisson ou comme une douce chaleur, le plaisir est plus qu'un luxe éphémère, recherché uniquement quand les besoins fondamentaux sont satisfaits. Il permet aux animaux de satisfaire leurs besoins vitaux. La nourriture, le sexe et, dans certains cas, la communication sociale engendrent des sensations agréables et servent de récompenses naturelles à tous les animaux, y compris l'homme.

J. Olds et P. Milner essayèrent de reproduire ces découvertes en plaçant les électrodes – de façon plus ou moins approximative – dans différentes aires cérébrales. Ils trouvèrent des régions associées au comportement inverse : les rongeurs aimaient les sentir stimulées par un léger courant électrique et s'efforçaient d'obtenir cette stimulation – de même qu'ils répètent une

Quand ces zones étaient stimulées alors que les rats se trouvaient en un lieu particulier d'une grande boîte, les animaux revenaient systématiquement vers ce lieu. De la sorte, ils pouvaient être conduits presque n'importe où. Dans certains cas, ils choisissaient même la stimulation plutôt que la nourriture : si les chercheurs déclenchaient la stimulation à mi-parcours d'un labyrinthe au bout duquel les rats savaient qu'une friandise les attendait, les animaux s'arrêtaient sans chercher à aller plus loin. Quand un dispositif permettait aux rats de stimuler leur propre cerveau en appuyant sur un petit levier, ils le faisaient de façon quasi obsessionnelle – jusqu'à plus de 1 000 fois en une heure. Lorsqu'on coupait le courant, les rats appuyaient encore sur le levier plusieurs fois, avant de s'en désintéresser et d'aller dormir.

Une mesure inadaptée du plaisir

Cependant, il y a environ dix ans, nous avons remis en question l'utilisation de la fréquence des autostimulations électriques comme mesure du plaisir. Les sujets pourraient les déclencher pour une raison autre que l'agrément de la sensation résultante.

Cependant, il y a environ dix ans, nous avons remis en question l'utilisation de la fréquence des autostimulations électriques comme mesure du plaisir. Les sujets pourraient les déclencher pour une raison autre que l'agrément de la sensation résultante.



LES AUTEURS



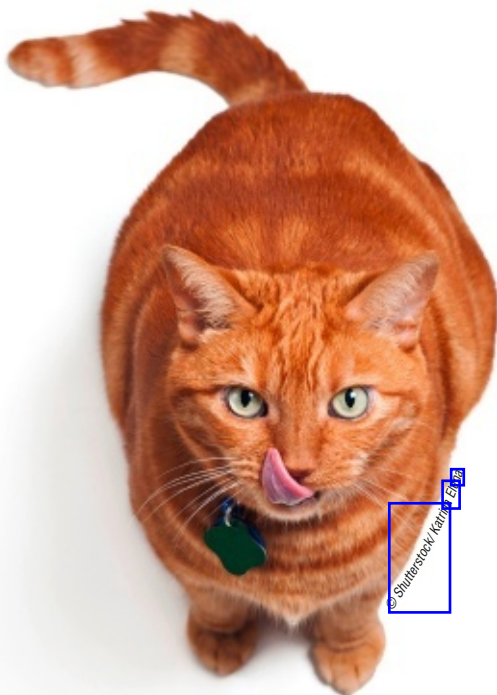
Morten KRINGELBACH dirige le groupe de recherche *Hedonia* : Trygffonden, des Universités d'Oxford, aux États-Unis, et d'Aarhus, au Danemark.



Kent BERRIDGE est professeur de psychologie et de neurosciences à l'Université du Michigan.

SUR LE WEB

Vidéo d'enfants, de primates non humains et de rats exprimant du plaisir et du dégoût : ScientificAmerican.com/aug2012/pleasure



1. DE NOMBREUX MAMMIFÈRES se lèchent les babines quand ils ressentent du plaisir en mangeant. On considère alors le nombre de fois où ils effectuent ce geste comme une mesure du plaisir.

Pour déterminer les circuits du plaisir avec plus de précision, nous devons concevoir une méthode différente, afin d'évaluer ce que les sujets – y compris les animaux – apprécient réellement.

Lors d'expériences sur des humains, on peut évaluer le plaisir par des questionnaires. Cependant, les réponses risquent d'être imprécises. En outre, une telle méthode est impossible avec les animaux de laboratoire, chez qui l'étude des mécanismes biologiques est plus facile.

Charles Darwin a suggéré une autre approche. Dans son ouvrage *The Expression of the Emotions in Man and Animals* (l'expression des émotions chez l'homme et les animaux), paru en 1872, il note que les animaux modifient leur comportement en réaction aux diverses situations environnementales – en d'autres termes, ils font des grimaces. Nous savons maintenant que les mécanismes neuronaux sous-tendant les expressions fonctionnent de la même façon chez la plupart des mammifères. En conséquence, certaines expressions faciales, affichées par exemple lors de l'ingestion d'aliments savoureux, sont partagées par des animaux aussi distants sur le plan de la parenté que les rongeurs et les hommes.

La nourriture est une des voies les plus universelles vers le plaisir – ainsi qu'un besoin essentiel. C'est aussi l'un des outils expérimentaux les plus accessibles pour les psychologues et les neuroscientifiques qui étudient le comportement animal. Ainsi, nous avons utilisé la réaction à la nourriture comme une fenêtre sur les plaisirs secrets.

Un aliment est dit palatable lorsque sa consommation procure une sensation agréable. Les bébés ont différentes façons d'exprimer la palatabilité de leur nourriture. Avec des aliments sucrés, ils se lèchent les lèvres de contentement, tandis qu'avec les aliments amers, ils ouvrent grand la bouche, se l'essuient vigoureusement et hochent la tête. Ces réactions apparaissent aussi chez les rats, les souris et les primates non humains. Plus les sujets aiment le goût, plus ils se lèchent les babines, comme pour en capturer les dernières molécules. En les filmant lors de l'ingestion de nourriture et en comptant le nombre de fois où ils manifestent ce comportement, nous avons estimé à quel point les stimulus gustatifs étaient appréciés. Nous avons ensuite utilisé cette information pour localiser plus

précisément les structures cérébrales responsables du plaisir.

Nous avons découvert qu'il ne naît pas tout à fait là où ni comme on le pensait. Situées notamment à l'avant du cerveau, les aires cérébrales qu'on supposait impliquées sont activées par la dopamine, un neurotransmetteur libéré par des neurones issus de la proximité du tronc cérébral. Nous pensions donc que de grandes quantités de dopamine déversées dans ces aires cérébrales modifieraient notablement le plaisir ressenti. Or ce n'est pas ce que nous avons observé.

Pour nos expériences, Xiaoxi Zhuang, de l'Université de Chicago, a modifié génétiquement des souris, afin qu'elles conservent une concentration élevée en dopamine dans tout le cerveau (les souris modifiées ne synthétisent plus la protéine qui recycle la dopamine libérée par les neurones activés). Lors de l'ingestion de friandises, ces souris ne semblent pas éprouver plus de plaisir que leurs compagnes non modifiées, qui ont des concentrations moyennes en dopamine. Elles se déplacent plus vite vers les friandises, mais ne se lèchent pas plus souvent les babines – au contraire, elles le font plus rarement. Le même phénomène est observé chez des rats dont la concentration cérébrale en dopamine a été augmentée par d'autres moyens – telle l'injection d'amphétamine dans le noyau accumbens ou la stimulation de cette aire cérébrale par des électrodes, qui influent sur la libération de dopamine.

La dopamine, plus liée à la motivation qu'au plaisir

Inversement, des rats privés de dopamine ne montrent pas le moindre désir pour les friandises. Ils vont jusqu'à mourir de faim quand ils ne sont pas activement nourris. Cependant, même s'ils ne se déplacent pas vers les friandises, ils les trouvent bonnes – à s'en lécher les moustaches – quand elles sont placées dans leur bouche.

Ainsi, la dopamine semble plus contribuer à la motivation qu'à la sensation de plaisir. Chez l'homme aussi, la concentration en dopamine est plus étroitement liée à la fréquence à laquelle des individus déclarent « désirer » une friandise qu'à celle à laquelle ils disent « l'apprécier ».

En conséquence, certaines des stimulations cérébrales par électrodes étaient peut-être moins agréables qu'on ne le pensait. Cette hypothèse est appuyée par les expériences sur les rats dont la concentration cérébrale en dopamine a été augmentée par des électrodes : incités à manger beaucoup de friandises par stimulation électrique, les animaux s'essuient la bouche et hochent la tête – des signes de dégoût, comme si la stimulation avait rendu les aliments écœurants. La consommation de grandes quantités d'une nourriture qui n'apporte pas de plaisir prouve que désirer et apprécier sont contrôlés par des mécanismes cérébraux différents.

Cela semble également le cas chez l'homme. La stimulation des aires du plaisir « classiques » par des électrodes a conduit au moins un patient à ressentir un intense désir de boire. Chez d'autres patients, dont B-19 (le sujet de Heath), la stimulation électrique a déclenché une forte pulsion sexuelle. À l'époque, de tels désirs sexuels étaient considérés comme un signe de plaisir. Cependant, nous n'avons jamais découvert dans la littérature scientifique la preuve qu'un patient ait trouvé les électrodes agréables : B-19 ne s'est pas exclamé une seule fois « Que c'est bon ! ». L'activation des électrodes entraînait simplement une recherche accrue de stimula-

tion – probablement non pas parce que les patients aimaient cela, mais parce qu'ils étaient poussés à le désirer.

Une telle distinction entre plaisir et désir serait manifeste dans la dépendance. Les drogues inondent le cerveau de dopamine, ce qui déclenche un besoin de consommer des drogues et rend les neurones plus sensibles à une future exposition. Terry Robinson, de l'Université du Michigan, aux États-Unis, a montré que cette sensibilisation peut persister pendant des mois, voire des années. Selon lui, l'action de la dopamine expliquerait pourquoi les toxicomanes ressentent toujours une envie irrésistible de consommer

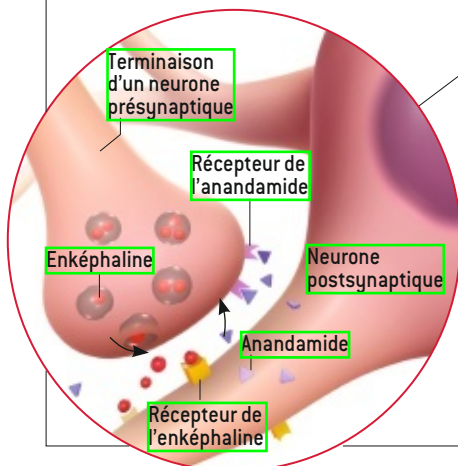
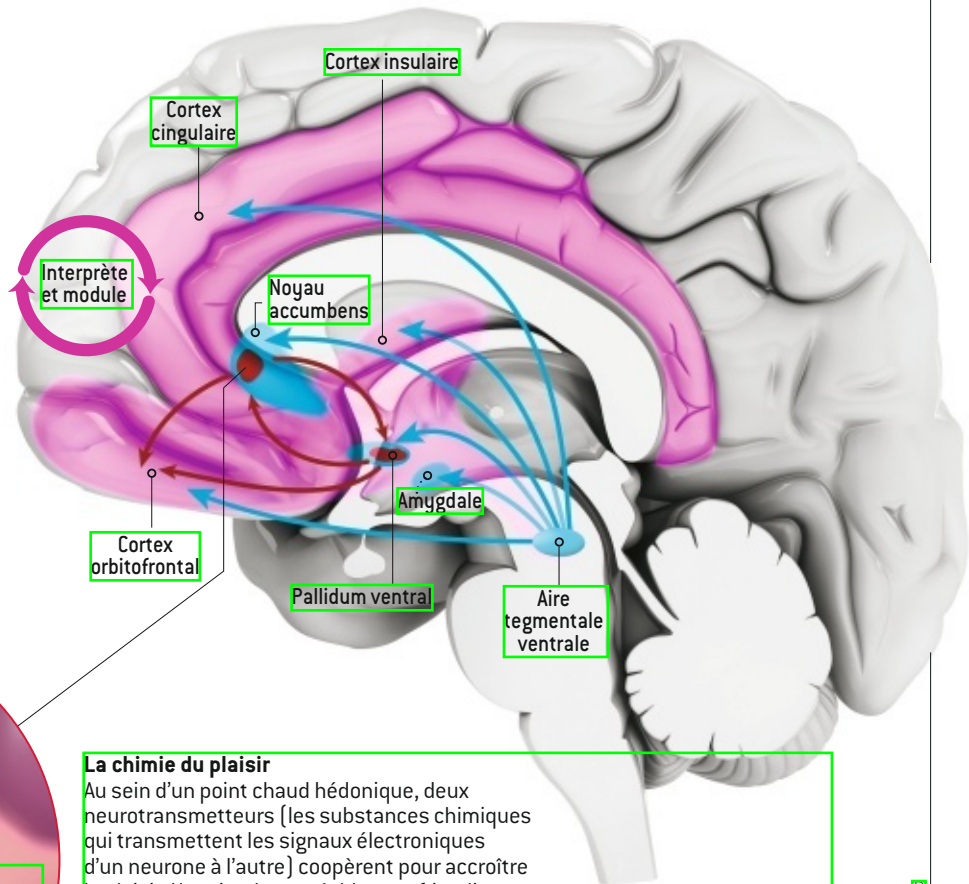
L'ANATOMIE DU PLAISIR

Le plaisir est un ressenti complexe, lié à l'anticipation, au désir, aux sensations, à la satisfaction... Il n'est donc pas surprenant que plusieurs régions cérébrales interagissent pour créer ce ressenti.

- Désir
- Plaisir
- Plaisir conscient

Entre désir et plaisir

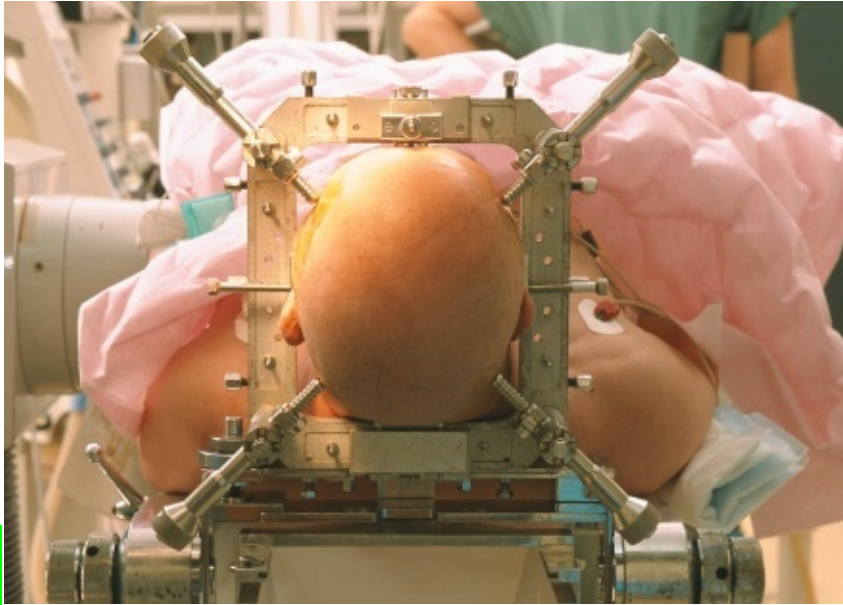
Un circuit neuronal (en bleu) qui commence à proximité du tronc cérébral et s'étend jusqu'au cerveau antérieur était autrefois considéré comme le médiateur du plaisir. Il est en fait focalisé sur le désir. La sensation de plaisir serait créée par l'interaction de plusieurs points chauds dits hédoniques, dont deux sont représentés ici (en rouge). Un ensemble de régions corticales (en rose) traduit ensuite en plaisir conscient les informations reçues des circuits du désir et du plaisir, en prenant en compte les signaux issus d'autres aires cérébrales.



La chimie du plaisir

Au sein d'un point chaud hédonique, deux neurotransmetteurs (les substances chimiques qui transmettent les signaux électroniques d'un neurone à l'autre) coopèrent pour accroître le plaisir. Un stimulus agréable, une friandise par exemple, entraîne la libération d'énképhaline, un opioïde fabriqué dans le cerveau (à gauche dans le zoom). L'énképhaline se fixe sur son récepteur situé sur un neurone voisin, déclenchant la production d'anandamide, un analogue du cannabis. L'anandamide quitte le neurone et interagit avec des récepteurs situés sur le neurone présynaptique, ce qui intensifie le plaisir et stimule peut-être la production d'énképhaline par une rétroaction positive.

DANS L'IMMAGINATION



2. L'IMPLANTATION D'ÉLECTRODES DANS LE CERVEAU pour soigner certaines maladies mentales est un domaine de recherche actif.

BIBLIOGRAPHIE

K. C. Berridge et M. L. Krangelbach, *Building a neuroscience of pleasure and well-being, Psychology of Well-Being : Theory, Research, and Practice*, vol. 1(3), 2011. www.psywb.com/content/1/1/3

M. L. Krangelbach et K. C. Berridge (éds.), *Pleasures of the Brain*, Oxford University Press, 2010.

S. Leknes et I. Tracey, *A common neurobiology for pain and pleasure, Nature Reviews Neuroscience*, vol. 9, pp. 314-320, 2008.

M. L. Krangelbach, *The Pleasure Center : Trust Your Animal Instincts*, Oxford University Press, 2008.

de la drogue, alors que le plaisir ressenti diminue à mesure des prises.

Outre le rôle de la dopamine, nos recherches ont précisé les aires cérébrales responsables de la production des sensations agréables – le circuit du plaisir à proprement parler. Nous avons ainsi localisé un ensemble de structures, qualifiées de points chauds hédoniques, situées au sein du circuit de la récompense. L'un des points chauds hédoniques se situe dans une sous-région du noyau accumbens nommée enveloppe médiane. Un autre se trouve au sein du pallidum ventral (près de la base du cerveau antérieur), une région qui reçoit la plupart de ses signaux du noyau accumbens.

Pour localiser ces points chauds, nous avons recherché les aires cérébrales qui amplifient le plaisir lorsqu'elles sont stimulées, par exemple en rendant les friandises encore plus savoureuses. La stimulation chimique des points chauds avec des enképhalines, des substances voisines de la morphine, mais fabriquées dans le cerveau, accroît le goût des rats pour ces aliments. L'anandamide, la version cérébrale du composant actif du cannabis, a le même effet. Une autre substance, l'oréxine, libérée par le cerveau en cas de faim, pourrait aussi stimuler les points chauds et rehausser la saveur de la nourriture.

Ces points chauds ont une petite taille, d'environ un millimètre cube pour un cerveau de rat et probablement d'un centi-

mètre cube au maximum pour un cerveau humain. Cependant, ils sont reliés entre eux – et à d'autres régions cérébrales impliquées dans le traitement des signaux de plaisir –, de sorte qu'ils s'intègrent dans un circuit complexe.

Ce circuit résiste assez bien aux perturbations. Dans nos expériences, l'inactivation d'un de ses composants ne trouble pas la réponse standard (correspondant à des plaisirs quotidiens), à une exception près : une lésion du pallidum ventral semble supprimer la capacité d'un animal à apprécier la nourriture, rendant désagréable un goût normalement agréable. En outre, la perte d'un des composants du circuit du plaisir rend plus difficile une euphorie intense – telles les « secousses » de plaisir que nous provoquons chimiquement chez des animaux de laboratoire. Une telle sensation semble requérir l'activation du réseau tout entier.

Nous ignorons si ce circuit du plaisir fonctionne de la même façon chez l'homme. Peu de patients ont des lésions localisées précisément dans ces aires, avec des zones environnantes intactes. Il est donc difficile de déterminer si ces composants sont essentiels à la sensation de plaisir chez l'homme. Cependant, un patient dont le pallidum ventral avait été lésé lors d'une overdose a déclaré se sentir dans un état de dépression, de culpabilité et d'incapacité à ressentir le moindre plaisir – ce qui conforte l'idée d'un rôle central, jusqu'ici sous-estimé, de cette aire cérébrale.

Une intensité modulée par plusieurs aires cérébrales

Le plaisir n'est pas uniquement régulé par le circuit identifié. D'autres aires cérébrales modulent son intensité en fonction de certains paramètres, notamment physiologiques : ainsi, le plaisir ressenti en mangeant est plus vif lorsque nous sommes affamés. Inversement, on peut se lasser d'un aliment agréable dont nous avons abusé.

Une telle satiété sélective pousse les animaux à rechercher une grande variété d'aliments, plutôt que de se contenter d'un mets favori. C'est sans doute l'une des raisons pour lesquelles elle a été sélectionnée au cours de l'évolution. Elle serait associée à une partie du cerveau nommée cortex orbitofrontal. Cette aire, située sur la face

inférieure du cortex préfrontal (juste au-dessus des yeux chez l'homme), reçoit des informations du noyau accumbens et du pallidum ventral. Elle semble moduler la représentation consciente du plaisir.

À l'aide de techniques de neuro-imagerie, nous avons découvert que l'activité d'une petite région du cortex orbitofrontal, le « site médioantérieur », est corrélée avec le plaisir sensoriel, tel le bon ou mauvais goût d'une boisson chocolatée. À la première gorgée, ce site est très actif, puis, lorsque les sujets ont suffisamment bu, il s'inactive : l'expérience cesse d'être agréable.

D'autres études ont montré l'importance du site médioantérieur pour le plaisir chez l'homme. Elles visaient à stimuler le cerveau profond à des fins thérapeutiques. Cette méthode est notamment utilisée pour soulager les douleurs chroniques rebelles. Nous l'avons appliquée à l'un de nos patients, qui avait été amputé et ressentait une douleur dans le membre manquant (on parle de membre fantôme) :

la stimulation d'une zone du tronc cérébral a non seulement soulagé sa douleur, mais lui a aussi procuré un intense plaisir. Une neuro-imagerie simultanée a révélé une bouffée d'activité dans le site médioantérieur. Peut-on soigner la dépression et d'autres formes d'anhédonie (une incapacité à ressentir du plaisir) en stimulant

LA DISSOCIATION ENTRE LES CIRCUITS du désir et du plaisir contribue peut-être à divers comportements compulsifs, tels que la boulimie ou les jeux d'argent.

des points chauds dans le circuit du plaisir ? Cette question fait toujours l'objet de recherches actives...

D'autres travaux s'intéressent aux liens entre les circuits du plaisir et de la récompense. En temps normal, les points chauds hédoniques sont couplés avec le circuit de la récompense piloté par la dopamine, de sorte que nous désirons des choses qui nous apportent du bien-être, et que nous

évitons ou ignorons celles qui ne le font pas. Dans le cas de la dépendance, ces systèmes sont déconnectés : un individu continue de désirer des choses qui ne lui apportent plus de plaisir. Cette dissociation contribue aussi peut-être à d'autres types de comportements compulsifs, tels que la boulimie ou les jeux d'argent. Comprendre comment et pourquoi elle se produit permettra peut-être de l'inverser, et ainsi de soigner la dépendance en restaurant les liens naturels entre désirer et aimer.

Aristote affirmait que le bonheur est constitué de deux composantes : *hedonia*, le plaisir, et *eudaimonia*, la félicité. Si nous connaissons mieux les fondements biologiques du plaisir, nous en savons encore très peu sur la façon dont le cerveau donne naissance à l'*eudaimonia*. Espérons qu'avec le temps, nos connaissances progresseront également sur ce second point, et que les découvertes à venir permettront aux hommes d'aller au-delà du simple plaisir, vers le bonheur... ■



LES {Partagez les savoirs} RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

Entrée gratuite

Au Jardin des Plantes

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

CONFÉRENCES

Cycle : "Dinosaure, la vie en grand"

Lundi 12 novembre – 18h
Gigantisme chez les reptiles marins du Mésozoïque
Nathalie Bardet, spécialiste des reptiles marins du Mésozoïque, Muséum

Lundi 19 novembre – 18h
Que savons-nous vraiment de la paléobiologie des sauropodes ?
Ronan Allain, paléontologue, spécialiste des dinosaures, Muséum

Lundi 26 novembre – 18h
Croissance et mode de vie des grands dinosaures : ce que nous apprend l'histologie
Armand de Ricqlès, paléobiologiste, professeur honoraire au Collège de France

Lundi 3 décembre – 18h
La température et la vie à travers les âges
Gilles Boeuf, Président du Muséum, professeur à l'Université Pierre et Marie Curie

FILMS

Cycle : "Montagnes, les horizons gagnés"

Dimanche 4 novembre – 15h30
Alpes 300 – 500 m (2011, 19'), Le Jannu (1959, 22'), Un nuage sur le toit du monde (2012, 52')

Dimanche 18 novembre – 15h30
Cold (2011, 20'), Gasherbrum la montagne lumineuse (1985, 45')

MÉTIER DU MUSEUM

Dimanche 25 novembre – 15h : **Paléontologue**
Ronan Allain

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



La sélection de livres

■ POUR LA SCIENCE

Les noms des lauréats des prix Nobel 2012 de physique et de chimie ont été annoncés début octobre. Par leurs travaux, ils poursuivent ceux de leurs illustres prédécesseurs. *Pour la Science* vous propose de revenir sur ceux qui ont marqué l'histoire des sciences.

Bonne lecture !

En partenariat
avec les éditeurs

Belin:
ÉDITEUR INDÉPENDANT
DEPUIS 1777



Tous ces livres sont
également disponibles
en librairie.

Pierre-Gilles de Gennes Gentleman physicien

Laurence Plévert

Si nous connaissons Pierre-Gilles de Gennes depuis le prix Nobel de physique qui lui fut décerné à l'automne 1991, c'est d'abord parce que ce chercheur hors normes a eu à cœur d'expliquer sa démarche et l'objet de ses travaux. Mais comment s'est bâti son génie ? D'où vient l'élégance des théories qu'il a élaborées et son goût pour l'éclectisme scientifique ? Une plongée dans l'œuvre et la personnalité de cet homme d'exception, qui aimait la vie autant que la science.

Editions Belin / Pour la Science 2009
368 pages - 23,85 euros - ISBN 978-2-7011-5228-8



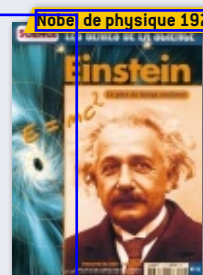
Nobel de physique 1991
Réf. 005228

Einstein Le père du temps moderne

Silvio Bergia

En 1905 Albert Einstein publiait trois articles fondateurs de la physique moderne. Pour comprendre ses travaux si novateurs, il faut les replacer au début d'un XX^e siècle foisonnant d'idées, où les physiciens discutaient avec passion de questions fondamentales : qu'est-ce que la lumière ? Les atomes existent-ils ? Découvrez, sous la plume d'un spécialiste, la vie et l'œuvre de ce savant.

Editions Belin / Pour la Science 2004
160 pages - 16,25 euros - ISBN 978-2-8424-5071-7



Nobel de physique 1921
Réf. 075071

Les Curie Pionniers de l'atome

Pierre Radvanyi

Trois prix Nobel dans une même famille : le cas est unique. Si Pierre et Marie Curie ont découvert la radioactivité des atomes lourds à la fin du XIX^e siècle, Frédéric et Irène Joliot-Curie ont découvert la radioactivité artificielle, à l'origine de précieuses applications. Un récit passionnant et magnifiquement illustré.

Editions Belin / Pour la Science 2005
160 pages - 16,25 euros - ISBN 978-2-7011-4224-1



Nobel de physique 1903 - Nobel de chimie 1911 et 1935
Réf. 004224

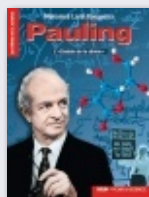
Pauling

Nobel de chimie 1954

Mohamed Larbi Bouguerra

Linus Pauling fut l'un des principaux architectes de la chimie moderne, en y introduisant la mécanique quantique, et l'un des pères fondateurs de la biologie moléculaire. À la fin de sa vie, il s'illustra en défendant les nombreuses vertus de la vitamine C. Il fut le seul lauréat à obtenir deux prix Nobel non partagés : celui de chimie en 1954 et celui de la paix en 1962.

Editions Belin / Pour la Science 2002
176 pages - 16,25 euros - ISBN 978-2-7011-2658-6



Réf. 002658

Fermi

Nobel de physique 1938

Michelangelo De Maria

Ce physicien italien fut considéré par ses contemporains comme le « pape » de la physique. Théoricien de génie et expérimentateur hors-ligne, il fut le dernier physicien universel. Pris dans la tourmente de la Seconde Guerre mondiale, il émigra aux USA où et il contribua à la fabrication de la première bombe atomique, tout en espérant qu'elle ne serait pas utilisée.

Editions Belin / Pour la Science 2002
160 pages - 16,25 euros - ISBN 978-2-8424-5049-6



Réf. 075049

Et pour revoir vos fondamentaux en physique et chimie :

La physique par les objets quotidiens



Réf. 004552

Cédric Ray, Jean-Claude Poizat

Savez-vous pourquoi le filament d'une ampoule à incandescence émet de la lumière ? Comment battre la seconde grâce à un cristal de quartz ? De quoi est composé un écran LCD ? Cet ouvrage propose toutes les réponses pour comprendre comment fonctionnent les objets de votre quotidien mais aussi toutes les clés pour se forger une « culture physique », et mener sa propre enquête sur le monde de plus en plus sophistiqué qui nous entoure.

Éditions Belin / Pour la Science 2007
160 pages - 24,25 euros - ISBN 978-2-7011-4552-5

Matière et matériaux



Réf. 005182

Etienne Guyon, Alice Pedregosa, Béatrice Salviat

Quel est le point commun entre une tige de rhubarbe, une poutre en béton précontraint et les vitres de la pyramide du Louvre ? Comment distinguer une mousse d'une émulsion ? Derrière ces questions disparates se cache un principe fondateur de la science, celui de l'universalité de la matière et de ses propriétés. Un passionnant voyage dans toutes les échelles de la matière.

Éditions Belin / Pour la Science 2010
336 pages - 27,90 euros - ISBN 978-2-7011-5182-3

Petit précis de Physique à déguster



Réf. 005958

Isaac Mc Phee

Vous êtes intrigué par la physique, mais la théorie vous rebute ? Vous vous interrogez sur les applications de la physique ou sur l'histoire des idées ? Alors, vous prendrez plaisir à lire ce *Petit précis de Physique à déguster*. Compagnon parfait du débutant curieux comme de l'amateur éclairé, cette introduction ludique au monde de la physique s'adresse à tous.

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

Petit précis de Chimie à déguster



Réf. 005959

Joël Levy

Depuis les premiers penseurs grecs jusqu'aux questions les plus contemporaines, le lecteur est entraîné au fil des pages dans un voyage fascinant à travers la vie et les découvertes des grands chimistes. Ce *Petit précis de Chimie à déguster* comporte des exercices récréatifs, des énigmes théoriques, etc. Autant de défis à la portée de tous.

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

Pour commander ces ouvrages

renvoyez le bon de commande ci-dessous

ou connectez-vous sur www.pourlascience.fr/librairie

LA SÉLECTION

POUR LA
SCIENCE
C'EST AUSSI...

Feynman

Les génies de la science n°19

Mai 2004
96 pages
7,00 euros

Réf. 075068

Nobel de physique 1965



Niels Bohr

Les génies de la science n°34

Février 2008
96 pages
6,90 euros

Réf. 075093

Nobel de physique 1922



Pierre-Gilles de Gennes

Les génies de la science n°40

Août 2009
96 pages
6,90 euros

Réf. 075097

Nobel de physique 1991



BON DE COMMANDE

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

☐ Oui, je commande 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

Belin
INSTITUT INDÉPENDANT
DEPUIS 1777



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 ☐.

DPL421 Offre valable jusqu'au 30/06/13 dans la limite des stocks disponibles.

HISTOIRE DES SCIENCES

Comment on a déclaré la guerre au DDT

Dans un livre paru en 1962, l'Américaine Rachel Carson dénonçait pour la première fois l'impact des pesticides sur l'environnement et la santé. Une question initialement agricole est ainsi devenue un enjeu de société.

Valérie CHANSIGAUD

Le 16 juin 1962, l'hebdomadaire *New Yorker*, connu pour ses engagements en faveur de la littérature contemporaine américaine, publie des extraits d'un nouveau livre, *Silent Spring* (Printemps silencieux). L'auteure, Rachel Carson [1907-1964], n'est pas une inconnue des lecteurs de ce magazine, ses livres précédents ayant également fait l'objet de bonnes feuilles. Elle abandonne dans ce nouvel opus ses sujets de prédilection, la mer et la biologie marine, pour dresser un panorama impitoyable de l'impact du DDT et des pesticides de synthèse sur l'environnement et la santé humaine. Lu par des millions de personnes, *Silent Spring* a eu des retombées sociales considérables : l'ouvrage a fait des questions environnementales un enjeu pour l'ensemble des citoyens, et a fait entrer l'écologie dans le vocabulaire des politiques. Mais comment une question principalement agricole est-elle devenue un tel enjeu de société ?

La lutte chimique contre les insectes est ancienne, puisqu'on a utilisé de la chaux et du soufre dès l'Antiquité. L'arsenal des agriculteurs s'est enrichi avec les voyages et les progrès techniques : la nicotine du tabac d'origine américaine a commencé à être utilisée à la fin du XVII^e siècle ; les pyréthrines, tirées de plantes de la famille des Astéracées, ont été employées dans les Balkans et le Caucase au début du XIX^e siècle ; la roténone, tirée d'une Fabacée (*Paradellia elliptica*) cultivée en Malaisie, faisait l'objet d'une production quasi industrielle vers 1850.

Mais, comme on l'expliquera ici, c'est l'essor combiné de l'agriculture intensive aux États-Unis et des industries chimiques durant la seconde moitié du XIX^e siècle qui a favorisé le fort développement des pesticides de synthèse.

L'Amérique du Nord, paradis pour insectes nuisibles

Au début des années 1840, un inoffensif coléoptère des montagnes Rocheuses, le doryphore (*Leptinotarsa decemlineata*), se découvre un appétit démesuré pour les champs de pommes de terre des colons



1. UN PULVÉRISATEUR de vert de Paris (un acéto-arsénite de cuivre), dessin paru dans l'ouvrage *Spraying Crops* (Pulvériser les cultures) de C. M. Weed (1895).

nouvellement installés dans la région. On cherche à lutter contre sa prolifération par tous les moyens, et l'on découvre que le vert de Paris (un acéto-arsénite de cuivre), souvent utilisé comme colorant, est efficace. Le vert de Paris débute sa carrière d'insecticide en 1867 et le monde agricole américain vante très vite ses mérites. Cet emballement pour les insecticides chimiques transforme les pratiques agricoles : les pages de la presse spécialisée se remplissent de recettes, de dessins d'appareils de pulvérisation, de publicités pour une large gamme de produits, mélanges un peu effrayants de soude, de kérosène, d'aniline, d'arsénicaux, de plomb, de cuivre...

Cela a pourtant immédiatement suscité des oppositions. Ce fut le cas des apiculteurs qui se sont alarmés dans les années 1880 de la destruction de leurs ruchers, consécutive à des pulvérisations de vert de Paris dans les vergers. Les propriétaires des vergers niaient que les pesticides employés aient pu être la cause de la mort des abeilles, insectes qu'ils considéraient de toute façon avec une certaine hostilité, car ils avaient la réputation d'abîmer les fruits.

Il s'ensuivit l'une des premières controverses scientifiques autour des pesticides, qui n'a été résolue qu'en 1895, lorsqu'un rapport établit de façon certaine que les tissus des abeilles mortes à proximité de vergers contenaient bien de l'arsenic. Ce rapport a fait naître l'une des toutes premières recommandations environnementales en matière de pesticides, avec la prohibition des pulvérisations durant la floraison des vergers.



2. DÉMONSTRATION DE PULVÉRISATION aérienne de DDT le 9 août 1945 sur l'aérodrome *Congressional Airport*, près de Washington. Pour lutter contre le paludisme, les États-Unis allaient ainsi épandre massivement du DDT sur des zones de reproduction des moustiques en Europe.

La place de la chimie dans l'agriculture américaine traduisait des changements profonds, liés à l'amélioration des transports : une régionalisation de l'agriculture où la polyculture cédait devant la monoculture, les surplus étant facilement écoulés sur des marchés de plus en plus globalisés. La simplification des écosystèmes conduisait à la prolifération de certaines espèces d'insectes, dont la dissémination était facilitée par les transports... L'origine étrangère de la plupart des plantes cultivées en Amérique du Nord accentuait encore les problèmes : leurs ravageurs ne tardaient pas à être importés accidentellement de leurs régions natales, l'Europe ou l'Asie.

Les États-Unis n'étaient pas qu'un paradis pour les insectes, ils étaient aussi une terre d'élection pour les scientifiques. Le *Hatch Act* de 1887, en instaurant un réseau de stations expérimentales agricoles unique au monde, permit l'émergence d'un corps de professionnels spécialisés dans les questions agricoles et entomologiques.

Deux hommes orientèrent durablement l'entomologie appliquée aux États-Unis et la lieront intimement à l'industrie chimique : Charles Riley (1843-1895) et son élève et successeur, Leland Howard (1857-1950).

Ils firent du bureau de recherche entomologique un véritable empire au sein du ministère fédéral de l'Agriculture. L'entomologie américaine se professionnalisa et s'orienta résolument vers des questions appliquées, avec des publications et une société savante spécifiques, des formations standardisées dans les principales universités... Surtout, elle se donna pour mission d'améliorer par tous les moyens la production agricole, ce qui explique son implication dans l'émergence et la diffusion d'une « culture » chimique dans l'agriculture américaine.

Les entomologistes impliqués

Pour autant, les scientifiques américains ne cherchaient pas à imposer aux agriculteurs des solutions chimiques, ils répondaient simplement à une demande sociale. Lorsqu'en 1894, un fermier du Texas informe le ministère de l'Agriculture que ses champs de coton sont victimes d'un petit coléoptère, le charançon du coton (*Anthonomus grandis*), Howard dépêche immédiatement un entomologiste, Charles Townsend, pour l'étudier. Ce dernier recommande alors la modification des pratiques culturales, notamment

par l'abandon de la culture du coton en bordure de l'aire de répartition de l'insecte, la mise en place de quarantaines, la diversification des espèces cultivées, la destruction par le feu des cultures infestées, etc. Mais les préconisations de Townsend ne pouvaient être appliquées qu'avec la pleine coopération des agriculteurs et un strict contrôle par le gouvernement. L'idée que certains agriculteurs puissent déroger à ces recommandations, et ainsi ruiner les efforts de chacun, contribua largement à rejeter ces propositions.

On testa et on breveta alors une infinité de remèdes, allant des pièges lumineux à l'électrification du sol, mais ce sont les méthodes chimiques qui eurent la plus grande faveur des agriculteurs. Au début du XX^e siècle, les entomologistes du ministère fédéral de l'Agriculture préconisèrent ainsi l'arséniate de calcium, en précisant toutefois que ce produit ne pouvait être efficace qu'en complément aux modifications des pratiques culturales déjà conseillées. Cette précision fut rapidement oubliée et la chimie devint le moyen unique de contrôle du charançon.

En 1918, l'unique fabricant peinait à fournir 23 tonnes d'arséniate de calcium ;

en 1920, plus de 20 producteurs en écoulaient plus de 4 500 tonnes par an ; en 1927, une compagnie se spécialisa dans les pulvérisations aériennes et s'annonçait capable de traiter plus de 2 000 kilomètres carrés... Jusqu'à la commercialisation du DDT, l'arséniate de calcium a été, avec l'arséniate de plomb, la substance chimique la plus utilisée comme insecticide.

L'essor de la chimie américaine après 1914

Ce développement de la chimie ne peut se comprendre sans être replacé dans le cadre de la Grande Guerre. Avant 1914, l'essentiel de la production des substances chimiques de base était assuré par l'Allemagne. L'embargo imposé sur l'industrie allemande permit aux compagnies américaines de trouver de nouveaux débouchés : leurs chiffres d'affaires ont été multipliés par 60 entre 1914

et 1917. Bien sûr, ces nouveaux géants (DuPont, Hercules, Dow Chemical Company...) ne produisaient pas que des pesticides, mais ils en sont devenus des acteurs majeurs, notamment en matière de régulation. La Première Guerre mondiale changea aussi la perception de la chimie : le rôle des gaz sur le champ de bataille comme les innovations en matière d'explosifs démontrèrent l'efficacité de la chimie moderne.

Gagner enfin la guerre contre les insectes nuisibles devenait envisageable. L'utilisation d'arsenic sur des substances alimentaires posait pourtant des problèmes sanitaires. Durant l'entre-deux-guerres, se sont mises en place deux façons de considérer cette question, qui expliquent en grande partie les conditions d'utilisation et de popularisation du DDT. D'un côté, le monde agricole (et ses alliés, les hommes politiques), les entomologistes et une grande partie des autorités de santé considéraient

qu'il ne faut prendre en compte que la dose d'intoxication des produits. En d'autres mots : si aucun effet direct n'est constatable, le produit est sûr. D'un autre côté, les consommateurs et leurs associations, l'Agence fédérale américaine des produits alimentaires et médicamenteux (la FDA) et quelques spécialistes de la santé publique s'intéressaient aux conséquences d'une exposition sur une longue durée et à des doses trop faibles pour provoquer un effet immédiat et visible.

Un véritable bras de fer s'engagea entre ces deux forces très inégales, dont l'enjeu était la mise en place d'une régulation acceptable par les industriels. La bataille fut largement gagnée par le lobby pro-insecticides, qui non seulement mit un terme au programme de recherche de la FDA sur les effets d'une exposition aux pesticides à des faibles doses, mais augmenta le seuil de tolérance des résidus de plomb dans les aliments, qui passa de 0,018 gramme par livre en 1935 à 0,025 gramme par livre en 1938.

Le DDT, ou dichlorodiphényltrichloroéthane, apparaît sur la scène internationale en 1943. Ce composé a été synthétisé en 1874, mais son action insecticide n'a été démontrée qu'en 1939 par le chimiste suisse Paul Müller. Or la guerre mondiale fait naître un grand besoin en insecticides : on craint les éventuelles épidémies de typhus (dont les poux sont vecteurs) en Europe et le paludisme pour les troupes engagées dans le Pacifique. Fin 1943, les États-Unis testent le DDT en grandeur réelle en Italie, afin d'y combattre les poux. La même année, une production industrielle de grande ampleur se met en place.

1943: le DDT, bombe atomique des insectes

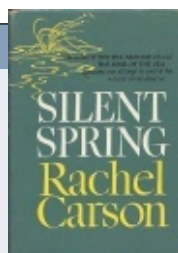
Et ce fut l'engouement : entre le mois de mai 1944 et l'automne 1945, le DDT fit l'objet de plus de 20 000 références dans la presse américaine ! Toute une littérature de propagande vit le jour, pour vanter son efficacité comme sa simplicité d'utilisation. Le DDT n'a pourtant pas été universellement célébré et a suscité de nombreuses inquiétudes. Dès 1944, des articles de spécia-

Le parcours d'une auteure à succès

Rachel Carson (1907-1964) est très tôt passionnée par la nature et l'écriture, et fait paraître son premier texte à dix ans dans un célèbre magazine pour enfants, *St. Nicholas*. Elle lutte une grande partie de sa vie pour subvenir aux besoins de sa famille après la mort de son père et de sa sœur. Parce qu'elle est contrainte de rechercher un emploi, elle abandonne ses études de zoologie et son projet de thèse. Elle passe brillamment le concours d'entrée dans l'administration fédérale et obtient un poste à l'*U. S. Bureau of Fisheries* (bureau fédéral des pêches).

Cependant, Rachel Carson ne cesse jamais d'écrire et, outre les publications réalisées pour son employeur, elle fait paraître de nombreux textes pour le grand public sur la nature et sur la mer. Dès son deuxième livre, *The Sea Around Us* (Cette mer qui nous entoure, 1951), elle obtient un succès qui lui permet de devenir un écrivain à part entière, s'inscrivant dans la longue tradition américaine des auteurs sur la nature, ou *Nature Writing*.

La célébrité de *Silent Spring* (Printemps silencieux), paru en 1962, a fait oublier le reste de l'œuvre de Rachel Carson, comme *The Edge of the Sea* (Les Merveilles de la mer et de ses rivages, 1955) resté 39 semaines à la première place de la liste des best-sellers du *New York Times*. Tous les critiques ont loué ses qualités littéraires qui lui ont valu de nombreux prix et hommages, dont la médaille Burroughs, la médaille Audubon ainsi qu'un siège à l'Académie américaine des arts et des lettres.



© PHOTOMONTAGE - ESTHER ZULMA PRESS/OTUS

listes tentent d'alerter l'opinion des dangers d'un insecticide trop puissant ou utilisé sans contrôle. L'activité scientifique sur l'impact du DDT est intense et conduit à des tests sur la faune sauvage à partir de 1945. C'est cette riche littérature scientifique, souvent produite au sein des organismes gouvernementaux, qu'a exploitée Rachel Carson pour son livre.

L'histoire du DDT est indissociable des transformations du monde de l'après-guerre. Son usage n'avait de sens que parce que l'agriculture s'industrialisait massivement : la place croissante de la monoculture favorisait la prolifération des ravageurs ; les variétés cultivées étaient plus productives, mais aussi plus fragiles, ce qui nécessitait l'emploi intensif d'engrais chimiques ; la mécanisation diminuait le besoin en main-d'œuvre, mais son coût incitait à rechercher une rentabilité maximale en augmentant les surfaces de monocultures... Par ailleurs, le contexte de la guerre froide a facilité l'exportation du modèle américain, le DDT étant l'un de ses symboles au même titre que le plastique, l'automobile ou la télévision.

La collusion entre recherche et industrie dénoncée

Les inquiétudes les plus vives au sujet du DDT ont été exprimées par des naturalistes amateurs de la Société nationale Audubon, et par des professionnels, dont ceux travaillant pour l'*U. S. Fish and Wildlife Service*. Le monde de l'entomologie appliquée était, quant à lui, largement indifférent à ces questions, d'autant que, avec le succès du DDT, les recherches d'après-guerre ont été réorientées vers la toxicologie ou la chimie, au détriment de la biologie des organismes.

Pourtant, l'entomologie américaine a longtemps été pionnière en écologie et elle disposait de tous les outils intellectuels et scientifiques pour comprendre et anticiper une bonne partie des problèmes posés par le DDT. Le cas du phénomène de résistance aux insecticides est à ce titre explicite. Le premier exemple de résistance à un pesticide inorganique avait été décrit en 1914



Une de E. H. Knab et Ch. H. Fernald, *The Gypsy Moth*, H. W. Vernal & Porter, 1893.

3. DES ARBRES TRAITÉS AVEC UN INSECTICIDE dans le Massachusetts, au XIX^e siècle, pour lutter contre la spongieuse, ou bombyx disparate (*Lymantria dispar*). Ce papillon a été introduit involontairement en Amérique en 1869 par le scientifique français Étienne Léopold Trouvelot, et y est devenu un fléau.

sous le terme « acclimatation » par l'entomologiste Axel Melander, et le premier cas observé de résistance au DDT (chez une mouche domestique) fit l'objet d'une publication en 1947. Pourquoi cette découverte n'a-t-elle pas conduit à une modification des pratiques ? Principalement parce que l'on s'était déjà engagé dans une course folle aux nouvelles molécules toujours plus puissantes et plus efficaces.

Rachel Carson est partie de ce phénomène de résistance pour expliquer l'existence d'autres alternatives. *Silent Spring*, bien loin d'être un discours contre la science ou le progrès, plaide pour une action raisonnée contre les insectes et mettait en avant la logique inhérente aux pesticides de synthèse : une foi aveugle dans la capacité du progrès technique à répondre à tous les problèmes. Avant Rachel Carson, le développement de ces substances – et les choix agricoles, industriels et environnementaux qu'ils supposent – reposait entièrement sur un trio constitué par les scientifiques, les industriels et le pouvoir centralisé. Son ouvrage, en dénonçant la collusion entre recherche et industrie et en vulgarisant des résultats scientifiques confidentiels, a marqué une étape décisive en permettant aux citoyens d'entrer dans le débat.

L'AUTEUR



Valérie CHANSIGAUD, historienne des sciences et de l'environnement, est chercheuse associée

au Laboratoire SPHERE (Science, philosophie, histoire) du CNRS et de l'Université Paris-Diderot.

À ÉCOUTER

Jeudi 1^{er} novembre, Valérie Chansigaud interviendra en compagnie de Patrick Matagne dans l'émission **La marche des sciences** consacrée à Rachel Carson : celle qui transforma l'Amérique !, sur France Culture de 14 h à 15 h. www.franceculture.com

BIBLIOGRAPHIE

J. E. McWilliams, *American Pests : The Losing War on Insects from Colonial Times to DDT*, Columbia University Press, 2008.



LOGIQUE & CALCUL

Les entiers ne naissent pas égaux

Il est impossible de définir une loi de probabilité uniforme sur l'ensemble des nombres entiers. Ce fait est étroitement lié à la loi de Zipf, une loi statistique dont les manifestations sont innombrables.

Jean-Paul DELAHAYE

Dans un dé à six faces, le « 1 », comme chacune des autres faces, a la probabilité $1/6$ de « sortir » et en lançant le dé on a une probabilité de $3/6 = 1/2$ d'obtenir un nombre pair. Sur un ensemble ayant n éléments, une probabilité est équilibrée (on dit aussi « uniforme ») quand chaque élément, comme une face d'un dé, a la même probabilité. La probabilité d'un sous-ensemble de p éléments est alors p/n , le quotient du nombre de « cas favorables » sur le nombre total de cas. Cette probabilité p/n est l'outil de base pour comprendre la roulette des casinos et les tirages du loto. La question est : que se passe-t-il quand le nombre total d'éléments est infini ?

Pour l'ensemble infini des nombres réels compris entre 0 et 1, il est facile de définir une probabilité uniforme. On obtient la mesure de Lebesgue découverte par Henri Lebesgue (1875-1941) au début du XX^e siècle. Cette mesure sur $[0, 1]$ est fondée sur la longueur des intervalles $[a, b]$ de $[0, 1]$ auxquels on attribue la probabilité $b - a$. Elle donne un sens à l'opération « tirer un nombre réel équitablement entre 0 et 1 ». Elle indique par exemple que la probabilité pour qu'un tel nombre se trouve à moins d'un centième de

$1/\pi$ ou de $1/e$ est exactement $1/25$, car la zone favorable est composée des deux morceaux disjoints $[1/\pi - 1/100, 1/\pi + 1/100]$ et $[1/e - 1/100, 1/e + 1/100]$ dont la longueur totale est $4/100 = 1/25$ (voir le schéma en bas de la page).

La mesure de Lebesgue montre aussi que les nombres rationnels sont négligeables : la probabilité de tirer au hasard un nombre rationnel est nulle et la probabilité de tirer un nombre irrationnel est égale à un. En effet, on sait enfermer les rationnels, qui sont numérotés par des entiers (ils sont dénombrables), dans une réunion d'intervalles de longueurs $c/2^n$, de longueur cumulée c que l'on peut rendre aussi petite que possible.

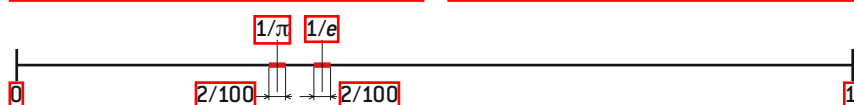
Étrangement, bien que l'infini dénombrable (celui des nombres entiers $1, 2, \dots, n, \dots$) précède et soit plus simple que l'infini des réels de l'intervalle $[0, 1]$ (dénommé « continu »), il est impossible d'y définir une probabilité uniforme qui jouerait, pour les entiers, le rôle que la mesure de Lebesgue joue pour $[0, 1]$. C'est très ennuyeux, car cela interdit de donner un sens mathématique au choix aléatoire équitable d'un entier. « Tirer un nombre réel au hasard entre 0 et 1 sans en favoriser aucun » est mathématiquement possible et la théorie moderne des probabilités déduit de la solution de Lebesgue des résultats concernant

la physique, l'économie et toutes sortes de problèmes concrets. « Tirer un entier au hasard, sans en favoriser aucun » n'a, en revanche, mathématiquement pas de sens pour quiconque veut rester dans le cadre de la théorie des probabilités fixée en 1933 par Andreï Kolmogorov. Nous allons voir cependant qu'il existe de subtiles et merveilleuses solutions de remplacement, nommées densités, mises au point pour les besoins de l'arithmétique et qui sont importantes pour comprendre les distributions statistiques concrètes.

Probabilités non uniformes

Pour déterminer la probabilité d'un ensemble de nombres entiers positifs en oubliant temporairement l'exigence d'uniformité, nous prenons une série $\{a_n\}$ de nombres positifs ou nuls dont la somme est égale à 1, par exemple $a_n = 1/2^n$ qui vérifie bien $1/2 + 1/4 + \dots + 1/2^n + \dots = 1$. Une fois $\{a_n\}$ choisi, la probabilité d'un ensemble d'entiers A est la somme des termes a_n dont l'indice n est un élément de A .

Avec le choix $a_n = 1/2^n$, nous trouvons que l'ensemble I des nombres impairs $\{1, 3, \dots, 2n+1, \dots\}$ a pour probabilité $1/2 + 1/8 + 1/32 + \dots + 1/2^{2n+1} + \dots = 2/3$ et que l'ensemble P des nombres pairs $\{2, 4, \dots, 2n, \dots\}$ a pour probabilité $1/3$. Ce n'est guère satisfaisant : cela ne semble





1. Probabilités des entiers dans l'encyclopédie de Neil Sloane

Il est impossible d'associer une probabilité uniforme aux entiers (probabilité qui donnerait à chaque entier la même probabilité). En effet, la probabilité d'un sous-ensemble des entiers est égale à la somme des probabilités de chaque élément : si la probabilité d'un entier est non nulle, la probabilité de l'ensemble des entiers est infinie, ce qui ne convient pas pour une probabilité ; si elle est nulle, alors la probabilité de l'ensemble des entiers est nulle aussi, ce qui ne convient pas mieux. Pour traiter des probabilités d'ensembles d'entiers, il faut attribuer des probabilités différentes aux entiers, de la meilleure façon possible. L'étude des entiers présents dans l'encyclopédie de Sloane est un guide pour trouver cette meilleure attribution.

L'encyclopédie des suites numériques de Neil Sloane contient un

grand nombre de fois l'entier 1, un peu moins souvent l'entier 2, etc. La courbe, notons-la $Sloane(n)$, donnant le nombre d'occurrences de n en fonction de n ressemble à un nuage de points globalement décroissants. Classés par nombre d'occurrences décroissantes, on a une loi de type $C/n^{1,3}$, où C est une constante. Le nuage de Sloane est lié à la complexité de Kolmogorov et cela justifie que l'on retrouve une loi de Zipf. La courbe $Sloane(n)$ est une version approchée de la courbe $C/2^{K(n)}$, où $K(n)$ désigne la complexité de Kolmogorov de l'entier n , qui vaut typiquement $\log_2(n)$: quand n est « complexe », $K(n)$ est grand (n est impossible à définir simplement), $1/2^{K(n)}$ est petit et donc le point correspondant de $Sloane(n)$ est bas. C'est pourquoi aussi $1024 = 2^{10}$ est situé au-dessus des autres points de même ordre de grandeur : le fait

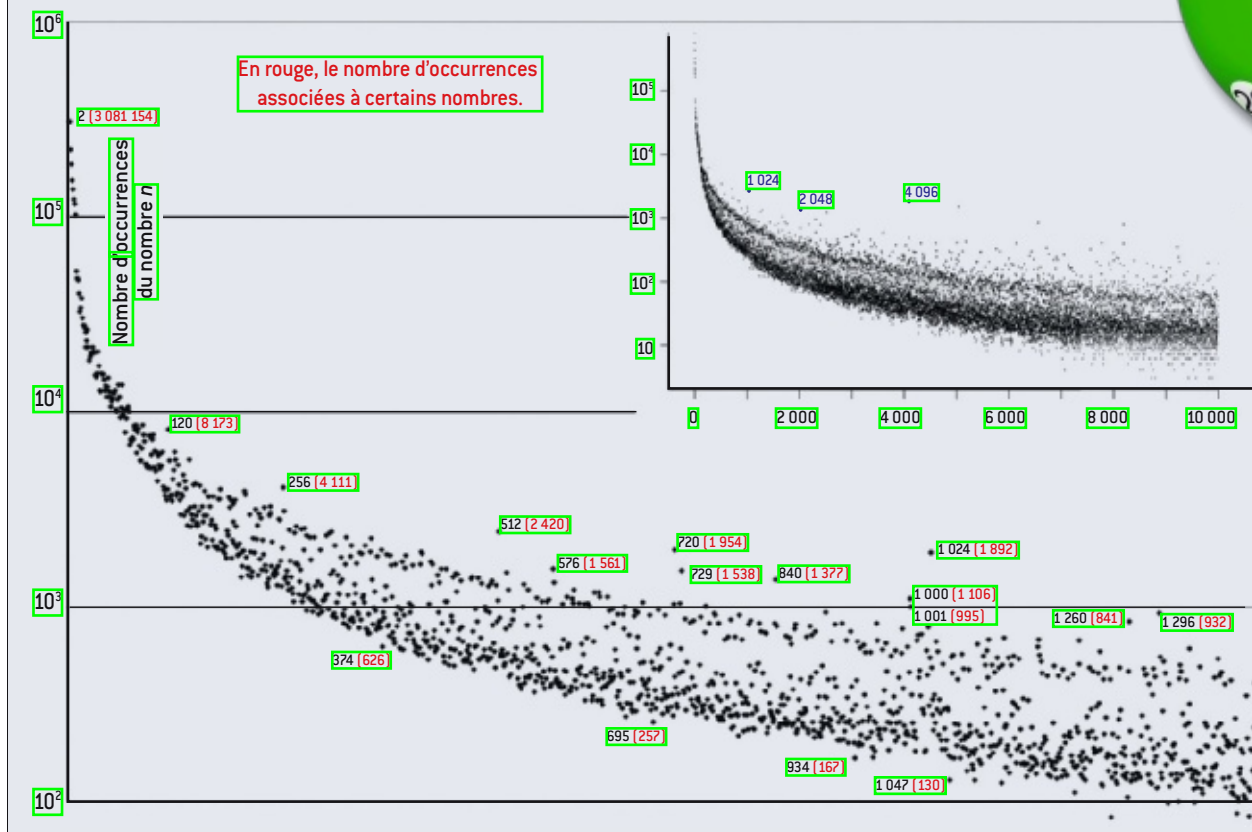
d'être une puissance de 2 a pour conséquence que sa complexité de Kolmogorov est faible et donc que son nombre d'occurrences dans la base (proportionnel à $1/2^{K(n)}$) est grand.

Cette représentation concrète de la complexité de Kolmogorov par le nuage de Sloane est légèrement biaisée par un effet culturel et social qu'on voit clairement sous la forme d'une zone claire, le fossé de Sloane, séparant le nuage en une partie inférieure et une partie supérieure.

Ce fossé étudié récemment (voir la bibliographie) est dû à ce que la communauté mathématique qui contribue à l'encyclopédie s'intéresse aux nombres entiers ayant une faible complexité de Kolmogorov (ce sont les nombres simples à définir et ayant plusieurs définitions), mais qu'elle s'y intéresse

d'une manière qui augmente la fréquence des nombres simples.

A cause des phénomènes culturels d'entraînements et de mode, les mathématiciens concentrent leur attention sur les nombres les plus simples, ce qui pousse les points correspondants de la courbe vers le haut, créant une zone évidée dans le graphe : le fossé.



2. La loi de Zipf

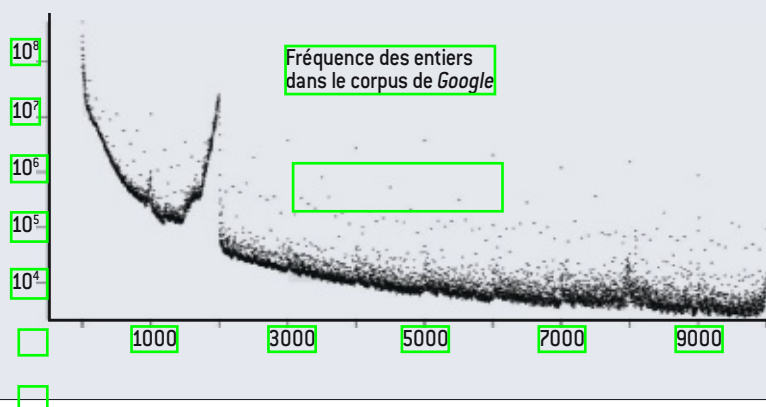
Si l'on classe les mots d'un texte par fréquence décroissante, on constate le plus souvent que la fréquence du mot en position n est C/n , où C est une constante. Cette loi, généralisée sous la forme C/n^e (où e est proche de 1), porte le nom de loi de Zipf.

Le travail de Zipf concernait le roman *Ulysse* de James Joyce. On retrouve la loi de Zipf dans de nombreux domaines, bien au-delà de la linguistique. Une série d'arguments présentés dans le texte de l'article conduisent à la voir comme une forme de loi, aussi équitable que possible, sur les entiers.



Analogue au nuage de Sloane de la page précédente, mais totalement indépendante, la courbe ci-dessous a été obtenue par Jim Fowler en utilisant les données de cinq millions de livres numérisés par la Société Google. Comme pour l'encyclopédie de Sloane, on a compté le nombre d'occurrences des entiers écrits en chiffres dans l'énorme base de textes de plus de 100 milliards de mots, constituée par le projet Culturomique autour de Jean-Baptiste Michel, de l'Université Harvard.

L'allure générale du « nuage des cinq millions de livres » est semblable à celle du nuage de Sloane. On a affaire à une loi de Zipf. Les biais sociaux produisent des effets de nature différente. Les nombres qui sont mentionnés en excès le sont non plus pour des raisons d'intérêt mathématique reconnu, mais pour des raisons contextuelles ou liées à l'usage du système décimal, qui favorise par exemple les nombres ronds (10, 50, 100, 1 000, 1 500, 5 000, etc.). Entre 1 et 100, un graphique à plus grande échelle ferait apparaître que le nombre 12 et ses multiples sont favorisés, ce qui est lié au rôle particulier du nombre 12 dans notre culture.



pas équitable, puisqu'il y a autant de nombres pairs que de nombres impairs et que ce sont deux ensembles d'entiers de même structure. Attribuer le poids $1/2^n$ à n n'est sans doute pas une bonne idée, mais il y a bien d'autres choix possibles pour $\{a_n\}$. N'y a-t-il pas, parmi toutes les séries $\{a_n\}$ utilisables pour « peser » les entiers et les ensembles d'entiers, certaines séries plus naturelles ou meilleures que d'autres ? Si oui, comment les trouver ? L'exigence que les nombres pairs et impairs aient chacun le poids $1/2$ servira de critère.

George Zipf compte les mots

La recherche de ce substitut à l'impossible probabilité uniforme sur les entiers semble avoir une solution. Nous allons voir qu'elle est liée à la théorie de la complexité de Kolmogorov, qui est la tentative mathématique la plus générale pour définir la notion de simplicité. Mais avant d'explorer les aspects théoriques et peut-être spéculatifs de cette solution, laissons-nous guider par des données concrètes.

En 1949, George Zipf examine la fréquence d'usage des mots dans le roman *Ulysse* de James Joyce. L'œuvre comporte 260 430 mots, dont 29 899 mots différents. Le mot le plus courant, *the*, apparaît environ deux fois plus que le deuxième (*of*), trois fois plus que le troisième, ..., 100 fois plus que le centième, etc. Dit autrement : en classant les mots par fréquence décroissante, la fréquence f_n du mot classé en position n est environ C/n , où C est une constante. Cette remarque qui s'étend à d'autres textes et d'autres langues est à l'origine du nom « loi de Zipf » donné à ce type de relations. Si des objets, pris dans un ensemble comportant éventuellement des répétitions et classés par fréquence décroissante $f_1, f_2, \dots, f_n, \dots$, vérifient approximativement une relation du type $f_n = C/n$, on dit qu'ils suivent une loi de Zipf.

L'histoire est souvent injuste. En effet, dès 1916, le Français Jean-Baptiste Estoup (1886-1950) avait fait une observation équivalente en étudiant des textes français. Zipf le savait puisqu'il indique dans son livre de 1949 : « La première personne (à ma connaissance) »

3. Densités naturelle et logarithmique

Si l'on nomme densité naturelle, pour un ensemble A d'entiers, la limite (à condition qu'elle existe), quand n tend vers l'infini, du quotient [nombre d'éléments de A inférieurs à n]/ n , on trouve que la densité naturelle des nombres pairs est $1/2$, comme celle des nombres impairs. Plus généralement, la densité naturelle des termes d'une suite arithmétique $an + b$ ($n = 1, 2, \dots$) existe toujours et vaut $1/a$. Malheureusement, les ensembles pour lesquels la densité naturelle est définie sont rares. Par exemple, l'ensemble des entiers qui, écrits en base 2, ont un nombre pair de chiffres n'a pas de densité naturelle. De plus, la réunion de deux ensembles ayant des densités naturelles n'en a pas nécessairement.

cessairement, ce qui empêche en particulier de considérer cette densité comme une probabilité.

Une découverte provient de l'étude de la densité logarithmique définie pour un ensemble A d'entiers par : $D_{\log}(A) =$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{\sum \{1/k; k \text{ dans } A, k \leq n\}}{\sum \{1/k; k \leq n\}} \right).$$

En d'autres termes, on retient $1/k$ pour chaque entier k présent dans A et inférieur à n ; on additionne ces $1/k$ et l'on normalise en divisant par la somme des $1/k$ pour k inférieur à n ; cela donne un poids d_n à l'ensemble A , dont on prend la limite (si elle existe) quand n tend vers l'infini pour tenir compte de tous les éléments de A quand l'ensemble est infini.

On a démontré que si l'ensemble d'entiers A possède une densité naturelle, alors A possède aussi une densité logarithmique et elles sont identiques. Autrement dit, en attribuant le poids $1/n$ à l'entier n , et en faisant tendre n vers l'infini après normalisation, on étend la notion de densité naturelle sans en perdre les bonnes propriétés. C'est utile car, avec cette extension, des ensembles plus nombreux ont maintenant une densité, c'est-à-dire une sorte de probabilité, et on a préservé l'idée que les nombres pairs et les nombres impairs avaient une densité $1/2$.

Notons que l'on ne peut pas po-

ser : $D_{\log}(A) = \sum \{1/k; k \text{ dans } A\} / \sum \{1/k; k \text{ entier}\}$, car la série harmonique $1 + 1/2 +$

$\dots + 1/k$ tend vers l'infini quand k tend vers l'infini.

Dans un cas concret, s'il n'y a qu'un nombre fini d'objets à prendre en compte, par exemple le nombre des mots dans un texte (fini), on peut choisir d'attribuer un poids C/n à chaque entier n et fixer C pour que le total des probabilités soit égal à 1, cela sans qu'il faille faire tendre n vers l'infini.

Dans le cas infini, la même idée est presque utilisable et c'est ce que propose la densité logarithmique. Autrement dit, affecter le poids C/n à chaque entier est un choix naturel, car il permet de définir une notion de densité qui étend la densité naturelle à chaque fois qu'elle est définie.

à avoir remarqué la nature hyperbolique de la fréquence d'usage des mots fut le sténographe français J.-B. Estoup. »

Passons sur cette navrante iniquité et indiquons que, depuis, on a vu ou cru voir des lois de Zipf dans un nombre considérable de situations concrètes. La loi semblerait concerner aussi bien la taille des villes classées par population décroissante, le nombre de citations que reçoit un article scientifique, le nombre d'articles qu'écrit un chercheur durant sa carrière, le nombre d'espèces par genre dans la classification des êtres vivants, le nombre de visites que reçoit une page Internet, l'expression des gènes, la musique, les cratères lunaires, les tremblements de terre, les taches solaires, etc.

On a généralisé la loi de Zipf par une loi de type $f_n = C/n^e$, où e est un exposant proche de 1. On la nomme aussi loi de puissance ou loi de Pareto (même quand e n'est pas proche de 1). Nous ne considérerons que les situations où des objets sont classés par ordre de fréquence décroissante et où la fréquence trouvée pour l'objet en position n est donc assimilable à une probabilité associée au nombre entier n . La régularité avec laquelle apparaissent des distributions de probabilités de type C/n^e (e proche de 1) pour les entiers

suggère qu'à la place de l'impossible probabilité uniforme sur les entiers, nous devrions, quand rien ne s'y oppose, considérer que les entiers ont une probabilité naturelle de la forme C/n^e (e proche de 1).

Récemment, grâce à la puissance des systèmes informatiques, deux nouveaux types de données, que nous nommerons « nuage de Sloane » et « nuage des cinq millions de livres », ont été constitués et ont appuyé l'idée qu'il y a quelque chose de particulier concernant les distributions de probabilité en C/n^e pour e proche de 1. Il semble de plus en plus certain que les distributions de probabilité sur les entiers de type loi de Zipf jouent un rôle spécifique et nullement fortuit.

Le nuage de Sloane

Le nuage de Sloane est obtenu en comptant le nombre d'occurrences de l'entier n dans l'encyclopédie des suites numériques de Neil Sloane (<http://oeis.org/>). Chacune des 200 000 suites de l'encyclopédie, que N. Sloane réunit depuis 1965 avec l'aide de la communauté mathématique, est stockée (on n'y garde qu'un nombre limité de termes, environ 150 caractères pour chaque suite). Seules les suites présentant un intérêt mathématique

sont retenues. La base de suites – qui est aussi une base de nombres entiers – associe une probabilité à chaque nombre entier, déduite de son nombre d'apparitions dans la base : le nombre d'occurrences d'un entier dans la base est une mesure de son importance mathématique et peut-être de sa probabilité objective d'apparition, si une telle notion a un sens. Le nombre d'occurrences de l'entier n dans la base, notons-le $Sloane(n)$, ne suit pas une courbe décroissante régulière. Cela est dû à ce que les mathématiciens concentrent leur attention sur certains entiers plus que sur d'autres. Les puissances de 2 (2, 4, 8, 16, ...) sont par exemple nettement favorisées, de même que les nombres premiers, ou les nombres ayant beaucoup de facteurs.

La courbe $Sloane(n)$, que nous nommons nuage de Sloane (voir l'encadré 2), doit être vue comme une représentation de l'intérêt mathématique relatif des nombres entiers. L'étude de ce nuage, suggérée par Philippe Guglielmetti, a été menée dans un article paru en 2011. Sous sa forme de nuage, ou redessinée pour classer les entiers par nombres d'occurrences décroissantes, on a affaire à une courbe proche de $C/n^{1.3}$, une loi de Zipf d'exposant 1,3. C'est tout à fait remarquable et la justification théorique de



4. De Benford à Zipf, et inversement

La loi de Benford indique qu'en prenant des nombres au hasard en grande quantité (par exemple des données géographiques), les nombres commenceront plus fréquemment par 1 que par 2, par 2 que par 3, etc. La probabilité $p(i)$ associée au chiffre i (pour $i = 1, 2, \dots, 9$) est $\log_{10}(1 + 1/i)$:

$p(1) = 30,1\%$, $p(2) = 17,6\%$, $p(3) = 12,5\%$, $p(4) = 9,7\%$, $p(5) = 7,9\%$, $p(6) = 6,7\%$, $p(7) = 5,8\%$, $p(8) = 5,1\%$, $p(9) = 4,6\%$.

La loi de Zipf, selon laquelle la distribution en C/n est une distribution naturelle pour des entiers, est liée d'une façon étonnante à la loi de Benford. D'une part, « Zipf »

donne « Benford » : la densité logarithmique, qui est fondée sur l'attribution du poids $1/n$ à l'entier n , est une traduction mathématique rigoureuse de la loi de Zipf généralisant la densité naturelle ; or elle attribue, comme la loi de Benford, la densité $\log_{10}(1 + 1/i)$ aux entiers commençant par i ($i = 1, \dots, 9$).

D'autre part, « Benford » donne « Zipf » : la loi de Benford pour une base de numération d quelconque indique que l'entier i est le premier chiffre d'un entier n avec une probabilité $\log_d(1 + 1/i)$, ce qui, lorsque i est assez grand, est en gros proportionnel à C/i , avec $C = 1/\log(d)$, ce qu'indique de son côté la loi de Zipf.

cette distribution que nous allons présenter établit un lien entre probabilité naturelle sur les entiers, complexité de Kolmogorov et loi de Zipf, ce que l'on peut voir comme un fondement théorique à la loi de Zipf.

La complexité de Kolmogorov $K(n)$ d'un entier est la taille du plus petit programme qui engendre n (dans un langage de programmation fixé). Les entiers ayant une définition simple (par exemple $2^{1000000}$) ont une faible complexité de Kolmogorov et ont en conséquence beaucoup de définitions assez simples. La théorie indique aussi que $K(n)$ est lié à la probabilité qu'un programme tiré au hasard produise n , par la relation $\text{Proba}[n] \approx 1/2^{K(n)}$, et donc à la probabilité que les suites mathématiques collectées dans l'encyclopédie de N. Sloane contiennent cet entier un grand nombre de fois. Cette dernière remarque suppose qu'on assimile ces suites numériques à des programmes, ce qui n'a rien d'absurde. Autrement dit, le nuage de Sloane est une version mathématique, concrète et humaine de la courbe représentant la fonction $1/2^{K(n)}$ déterminée par la complexité des entiers. Or la théorie indique que cette courbe suit une loi de Zipf, car $K(n)$ vaut typiquement $\log_2(n)$ et que $1/2^{\log_2(n)} = 1/n$. La complexité de Kolmogorov indiquait par avance que l'on a une loi de Zipf pour le nuage de Sloane, ce que l'étude statistique du nuage a confirmé.

Tout cela est remarquable et nous aide à comprendre la loi de Zipf. Même si d'autres mécanismes engendrent une loi de Zipf, celui lié à la théorie de la complexité est particulièrement frappant, puisqu'il indique un lien avec une distribution de probabilité naturelle fondée sur la complexité des entiers, lien

validé par l'étude du nuage de Sloane. Cette analyse est encore renforcée par l'étude d'un autre nuage étonnant, indépendant du premier, et qui est cette fois tiré d'une base de données de cinq millions de livres numérisés par la Société Google et exploitée statistiquement par une équipe de chercheurs de l'Université Harvard réunie autour de Jean-Baptiste Michel. L'article de cette rubrique dans *Pour la Science* d'août 2011 présentait cette mise à disposition et la science naissante qu'on prétend en déduire, dénommée « culturomique ».

Le nuage des cinq millions de livres

Jim Fowler, mathématicien à l'Université de l'Ohio, aux États-Unis, a calculé et représenté l'équivalent du nuage de Sloane pour les cinq millions de livres de la base de données de Google. Il a compté le nombre d'occurrences de chacun des nombres entiers de 1 à 10 000 et a dessiné les 10 000 points correspondants. La courbe obtenue (voir l'encadré 2) présente le même aspect général que le nuage de Sloane. Cependant, plusieurs différences sautent aux yeux... et s'expliquent facilement.

On observe notamment une sorte de sursaut violent de la courbe avant et du côté de l'entier 2 000. Cette perturbation correspond évidemment aux nombres désignant des années proches, car ces nombres sont cités fréquemment dans les textes des livres. Il s'agit d'un effet temporel et la même courbe tracée en 2100 montrera un sursaut équivalent du côté de 2 100. Un autre effet, cette fois « décimal », est aussi très net : les nombres ronds comme 1 000, 5 000, 8 000

ou même 7 500, 8 500, etc., sont plus cités que leurs voisins et se retrouvent donc au-dessus de la courbe générale. Notre usage du système décimal et la pratique des arrondis faussent la fréquence d'utilisation des nombres entiers en favorisant de manière prévisible certains d'entre eux.

L'étude détaillée du nuage montre d'autres étrangetés pas toujours aussi faciles à expliquer, mais qui proviennent de conventions, de codes ou de règles d'usage favorisant certains entiers. Malgré ces effets perturbateurs divers, la courbe (éventuellement redessinée pour classer les nombres par fréquence décroissante) se conforme très bien à une loi de Zipf d'exposant e proche de 1, comme celle du nuage de Sloane.

La comparaison des deux courbes est amusante et riche d'enseignement : là où l'intérêt mathématique favorisait les puissances de 2 et les nombres avec de nombreux diviseurs, c'est maintenant les conventions liées à la numération décimale ou à la mention des années du calendrier qui créent les plus fortes déviations. Aussi bien le nuage « mathématique » de Sloane que le nuage « culturel » des cinq millions de livres exhibent un tracé conforme à une loi en C/n^e . Ces traitements sur des données massives confirment que les répartitions de probabilité en C/n^e (e proche de 1) tiennent un rôle spécifique et doivent être retenues par défaut comme probabilités naturelles sur les entiers. Deux arguments de nature mathématique vont s'ajouter à celui de la complexité de Kolmogorov et justifier notre affirmation.

Un premier argument porte sur la densité naturelle (voir l'encadré 3). Un second

résultat quasi miraculeux confirme que C/n est théoriquement la plus équitable attribution de poids aux entiers. La densité $D_e(A) = \sum \{1/k^e, k \text{ dans } A\} / \sum \{1/k^e, k \text{ entier}\}$ est toujours définie si $e > 1$, car maintenant le dénominateur est fini (car la série de terme $1/k^e$ est de somme finie quand $e > 1$).

Comme $1/k^e$ est proche de $1/k$ si e est proche de 1, pour contourner la divergence de la série $\sum 1/k$, on définit la densité $D_z(A)$ de l'ensemble A d'entiers comme la limite, si elle existe, de $D_e(A)$ quand e tend vers 1. On la nomme parfois « densité zêta » (à cause du dénominateur qui est la fonction zêta de Riemann), d'où le « z ». Les ensembles d'entiers A dont la densité D_z existe sont les mêmes que ceux pour lesquels la densité logarithmique (voir l'encadré 3) existe, et alors les deux densités coïncident. Ce résultat remarquable est publié dans la thèse de Persi Diaconis (voir la bibliographie).

Les deux façons envisageables d'étendre la notion de densité naturelle en se fondant sur l'idée d'attribuer (autant que possible) une probabilité $1/n$ à l'entier n fonctionnent et conduisent de manière inattendue à la même notion. Le sens de ces théorèmes mathématiques est que, moyennant un petit passage par des limites pour contourner la divergence de $\sum 1/n$, il est possible de formuler une définition de « choix aléatoire équitable » entre entiers. Ainsi, la loi de Zipf est dans une position privilégiée par rapport à toutes les autres lois envisageables sur les entiers.

Benford retrouvé

Un dernier théorème s'ajoute aux arguments pratiques et mathématiques. La loi de Benford apparaît quand on examine le premier chiffre d'une série de données : la probabilité pour qu'un nombre entier pris dans un ensemble assez grand (par exemple dans le tableau des longueurs de tous les fleuves mesurées en kilomètres) commence par le chiffre i ($i = 1, 2, \dots, 9$) est $\log_{10}(1 + 1/i)$ et il y a donc plus de 30 % de chances (car $\log_{10}(2) = 0,30103$) que le premier chiffre d'un tel nombre soit 1 (voir l'article de janvier 2007 dans cette rubrique).

Une question s'est posée depuis longtemps : la liste des entiers vérifie-t-

elle la loi de Benford ? Autrement dit, le quotient (Nombre d'entiers $< n$ commençant par le chiffre i)/ n a-t-il pour limite $\log_{10}(1 + 1/i)$? Il se trouve que non : ce quotient n'a pas de limite quand n tend vers l'infini, mais oscille sans cesse, car les nombres commençant par i n'ont pas de densité naturelle. Maintenant que nous savons qu'on peut étendre la densité naturelle, reformulons la question : l'ensemble des entiers commençant par i ($i = 1, 2, \dots, 9$) a-t-il une densité logarithmique (ou, ce qui revient au même, une densité D_z) ? Comme par miracle, la réponse est oui, et la densité trouvée est $\log_{10}(1 + 1/i)$. Les entiers, traités équitablement, suivent la loi de Benford et il n'est donc pas étonnant que cette loi se rencontre si fréquemment.

À défaut de mesure de probabilité uniforme sur les entiers, la loi de Zipf joue le rôle d'une mesure naturelle. On le voit en observant la prévalence de cette loi pour des données concrètes (telles les fréquences d'utilisation des mots dans un texte). On le voit quand on s'aperçoit que la loi de Zipf est liée à la complexité de Kolmogorov des entiers. On le voit aussi quand on recherche les densités qui, pour les ensembles d'entiers, jouent le rôle de probabilités uniformes.

La preuve mathématique qu'avec ces densités en C/n , les entiers eux-mêmes vérifient la loi de Benford (et c'est vrai aussi des nombres premiers), renforce la conviction que ces densités tirées de la loi de Zipf sont les bonnes façons de choisir au hasard des nombres entiers. Le fait que la loi de Benford redonne en un certain sens la loi de Zipf est un argument supplémentaire, car il existe des explications directes de la loi de Benford, telle celle proposée par Nicolas Gauvrit et l'auteur de cette rubrique, et qu'elles sont donc aussi des explications de la loi de Zipf.

Le monde mathématique est déconcertant : l'infini dénombrable, le plus simple de tous, semble interdire qu'on en pioche les éléments au hasard équitablement, alors que le continu de l'intervalle $[0, 1]$, plus gros et plus compliqué que l'infini dénombrable, l'autorise. Heureusement, la loi de Zipf, à sa façon, joue ce rôle de probabilité uniforme sur les entiers. ■

L'AUTEUR



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

BIBLIOGRAPHIE

N. Gauvrit, J.-P. Delahaye et H. Zenil, *Sloane's Gap : Do mathematical and social factors explain the distribution of numbers in the OEIS ?*, *Journal of Humanistic Mathematics*, à paraître, 2012.

N. Gauvrit et J.-P. Delahaye, *Pourquoi la loi de Benford n'est pas mystérieuse*, *Mathématiques et Sciences Humaines*, vol. 182-2, pp. 7-15, 2008 (<http://msh.revues.org/10363>).

M. Newman, *Power laws, Pareto distributions and Zipf's law*, *Contemporary Physics*, vol. 46, pp. 323-351, 2005.

G. Tenenbaum, *Introduction to Analytic and Probabilistic Number Theory*, Cambridge University Press, 1995.

P. Diaconis, *Weak and Strong Averages in Probability and Theory of Numbers*, thèse de l'Université Harvard, 1974, http://www-stat.stanford.edu/ffcgates/PERSI/Persi_PhDdiss.pdf [c'est le document à lire sur les densités étendant la densité naturelle].

G. Zipf, *Human Behaviour and the Principle of Least Effort*, Addison-Wesley Publishing, 1949.

SCIENCE & FICTION

La Force des Jedis

Dans l'univers de La guerre des étoiles, elle serait conférée par des organismes microscopiques, les midichloriens. Qui sont ces « supports » de la Force ?

Jean-Sébastien STEYER et Roland LEHOUCQ

« **Q**ue la Force soit avec toi ! »
La Force est cette source de pouvoir des chevaliers Jedis dans l'univers de *Star Wars*. On apprend dans

le premier épisode, *La menace fantôme* (1999), que la Force a un support matériel, d'étranges organismes microscopiques nommés midichloriens. Une discussion entre le jeune Anakin Skywalker et son mentor Qui-Gon Jinn, nous en précise la nature :

« Les midichloriens sont des formes de vie microscopiques qui résident dans toutes les cellules vivantes et communiquent avec la Force. [Ils vivent] dans tes cellules. Nous vivons en symbiose avec les midichloriens. »

En introduisant les midichloriens dans l'histoire, le réalisateur George Lucas tente alors, au grand dam de ses fans, de donner une explication rationnelle à la Force. Approche scientifique ? Loin s'en faut si l'on regarde de plus près qui sont ces midichloriens venus de l'espace. Éliminons d'abord une éventuelle nature virale, les virus étant considérés comme des parasites intracellulaires, alors que les midichloriens sont des symbiotes, d'après la définition. Remarquons que le mot « midichlorien », forgé par G. Lucas, semble être un assemblage des mots « mitochondrie » et « chloroplaste », deux organites présents dans les cellules terriennes. Les mitochondries, localisées dans le cytoplasme, fournissent les molécules d'ATP (adénosine triphosphate), qui permet aux cellules de stocker de l'énergie. La mitochondrie est l'usine énergétique des cellules à noyau, dites eucaryotes, aussi bien animales que végétales.

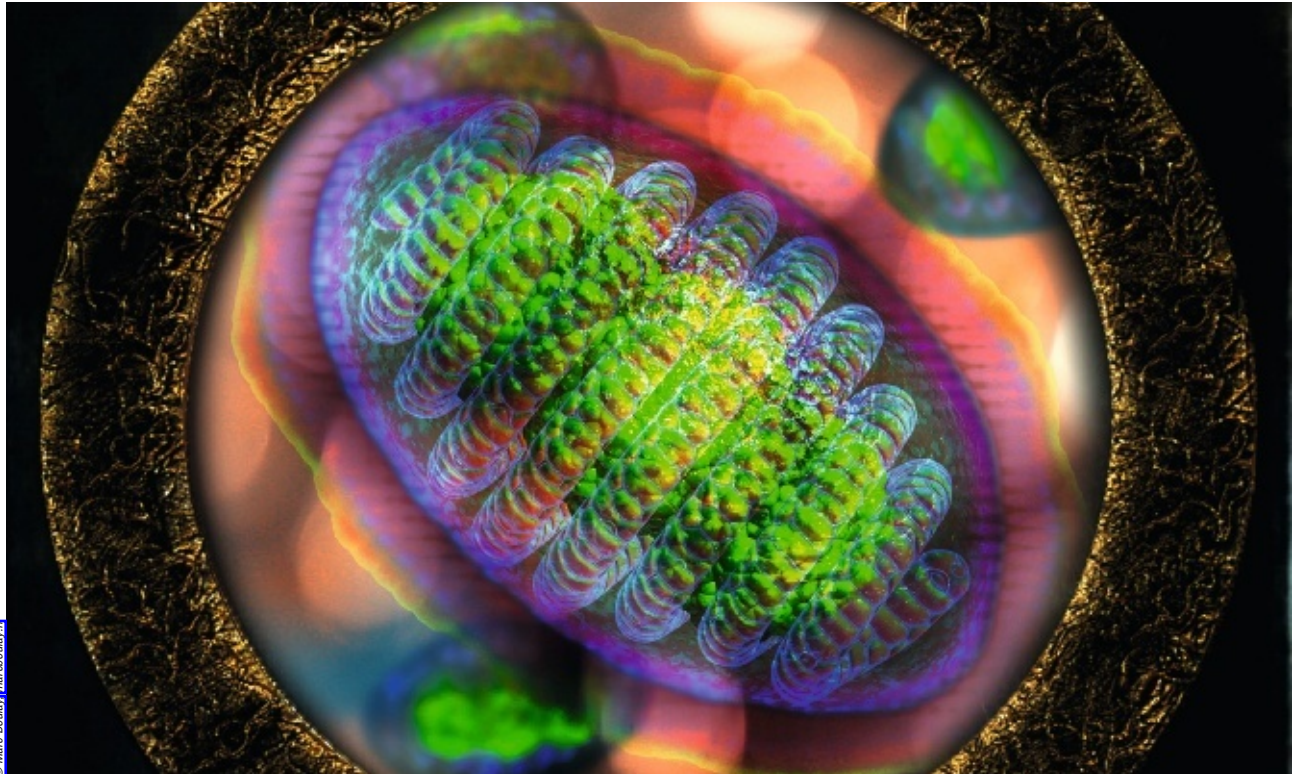


1. ANAKIN SKYWALKER, qui deviendra Dark Vador dans les épisodes ultérieurs de *La guerre des étoiles*, a une affinité marquée avec la Force. Cette dernière lui est conférée par les midichloriens, des micro-organismes présents notamment dans son sang.

Quant au chloroplaste, c'est un organite spécifique des cellules végétales qui permet la synthèse de la chlorophylle dans les algues et les plantes. Les mitochondries et les chloroplastes ont leur propre ADN, et seraient issus de bactéries (cyanobactéries pour les chloroplastes et protéobactéries pour les mitochondries) qui se seraient « alliées », il y a 1,5 à 2 milliards d'années, avec des cellules pour finir par y vivre en symbiose. Cette hypothèse de l'endosymbiose a été proposée en 1967. Ainsi, les mitochondries et les chloroplastes sont synonymes d'énergie vitale tant pour les animaux que pour les végétaux. L'assemblage des deux confère apparemment des pouvoirs hors du commun aux porteurs de midichloriens.

Mais, même s'ils semblent présenter des propriétés symbiotiques identiques à celles des mitochondries ou des chloroplastes, les midichloriens sont, toujours selon la description de Maître Qui-Gon Jinn, des organismes et non des organites. Ils peuvent même être considérés comme des organismes pathogènes ou mutagènes à part entière. Dès lors, du point de vue microbiologique, les Jedis seraient des mutants contaminés, et une analyse de sang permet d'identifier le stade de contamination, voire le degré de contagiosité ! D'ailleurs, pour tester l'affinité du jeune Anakin avec la Force, Qui-Gon Jinn lui fait une prise de sang visant à déterminer la quantité de midichloriens présents dans son organisme. Le fait que la présence de midichloriens soit quantifiable semble leur donner une base scientifique.

Résultat : 20 000. En quelle unité ? On l'ignore... Est-ce le corps du jeune homme qui en contient cette quantité ? Est-ce seulement



la goutte de sang prélevée ? Quoi qu'il en soit, cette valeur (supérieure à celle de Maître Yoda !) est si élevée que le Conseil des Jedis se demande si le jeune héros, qui n'a aucun père biologique rappelons-le, n'aurait pas lui-même été créé par des midichloriens pour rétablir l'équilibre de la Force dans l'Univers. Cette vieille prophétie souvent citée dans *Star Wars* n'a bien sûr aucun sens en termes d'évolution : elle rappelle l'ancienne théorie de la « génération spontanée », selon laquelle des organismes vivants complexes pouvaient apparaître sans ascendant, simplement à partir de matière inanimée.

Admettons un instant qu'Anakin ait réellement été fabriqué par des midichloriens ; son cas serait intéressant à l'aune de la classification systématique du monde vivant : notre héros passerait du statut d'organisme pluricellulaire (un jeune humanoïde) à celui de superorganisme, colonie dont les individus hyperspécialisés seraient des midichloriens. Cette frontière entre organisme et superorganisme est parfois floue sur Terre : c'est, par exemple, le cas des siphonophores, groupe bien réel d'étranges cnidaires (des sortes de méduses), qui vivent en colonie et dont les tentacules peuvent atteindre 40 mètres de longueur. Aux plans morphologique et fonctionnel, chacune des parties d'un siphonophore est tellement spécialisée dans la réalisation de tâches variées (locomotion, reproduction,

2. CE MIDICHLORIEN observé au microscope révèle une double spirale volumineuse qui contient son information génétique. Sur cette vue d'artiste, la membrane lumineuse ainsi que les « particules d'énergie » (en vert) trahissent la Force qu'il véhicule.

nutrition, etc.) que certains se demandent même si ces animaux ne seraient pas plutôt des superorganismes...

Résistant aux conditions extrêmes

Ainsi, nous savons désormais que la Force est directement liée au nombre de midichloriens. Mais... Si les midichloriens confèrent la Force et se multiplient dans le sang, pourquoi une simple transfusion ne suffit-elle pas pour devenir un Jedi ?

Puisque les midichloriens sont présents partout dans l'Univers, « infectant » les Jedis de toutes espèces et de toutes planètes, ces organismes doivent être des extrémophiles, capables de résister au vide intergalactique. En cela, ils évoquent certaines bactéries, telles que *Serratia liquefaciens* ou *Escherichia coli*, qui colonisent nos intestins, et sont capables de résister en laboratoire aux conditions drastiques qui règnent sur Mars.

Autre solution : les midichloriens pourraient s'enkyster pendant des millénaires, formant des formes végétatives hibernant quasi éter-

nellement. Ils se propageraient dans l'espace avant de trouver l'âme sœur... Ils évoqueraient alors les tardigrades, ces pseudo-arthropodes minuscules, capables de tolérer le vide spatial et rentrant en léthargie lorsque les conditions de vie ne sont pas favorables.

Mais étant donné l'éventail très large des Jedis et de leurs mondes d'origine, on peut se demander d'où viennent les midichloriens qui pullulent ainsi dans l'Univers. Sont-ils transportés par des météorites, astéroïdes ou autres comètes, ceux-là même qui, selon l'hypothèse de la panspermie, auraient apporté sur Terre certains des acides aminés à l'origine de la vie ? En raison des distances qui séparent étoiles et planètes, et donc les Jedis dans une galaxie, la dissémination et la divergence des midichloriens auraient pu avoir lieu durant la « jeunesse » de l'Univers. Et si l'ancêtre commun à toute forme de vie, LUCA (*Last Universal Common Ancestor*), hypothétique organisme archaïque âgé de 3,6 à 4,1 milliards d'années, avait été un midichlorien ? G. Lucas, comme le sont parfois les auteurs de science-fiction, serait alors un visionnaire ! ■

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

Retrouvez les articles de J.-S. Steyer et R. Lehoucq sur www.pourlascience.fr

ART & SCIENCE

Piero della Francesca et les « piles d'assiettes »

Le peintre italien de la Renaissance a représenté dans un cycle de fresques des nuages lenticulaires empilés : ces météores traduisent la formation d'une onde stationnaire dans laquelle l'air monte et descend périodiquement.

Loïc MANGIN

Qu'ont en commun l'église Saint-Calixte de Pontpierre (Moselle), la chapelle des Incurables de l'hospice de Baugé (Maine-et-Loire), la paroisse copte orthodoxe de Sarcelles (Seine-Saint-Denis) et l'abbaye de Saint-Guilhem-le-Désert (Hérault) ? Tous ces établissements religieux revendiquent la possession d'un morceau de la croix sur laquelle Jésus aurait été crucifié. Ils ne sont pas les seuls et, selon un adage, avec tout le bois de la croix, dite Vraie Croix, « on aurait pu chauffer Rome pendant un an » !

L'histoire de cette relique connaît plusieurs versions. La plus connue est contenue dans la *Légende Dorée* de Jacques de Voragine (1228-1298), archevêque de Gênes et dominicain. On la retrouve sous la forme d'un cycle de fresques dans le chœur de la chapelle Bacci de la basilique Saint-François, à Arezzo, en Toscane. On doit cette *Légende de la Vraie Croix* au peintre et mathématicien italien Piero della Francesca (1412-1492) qui prit la suite de l'artiste Bicci di Lorenzo à sa mort en 1452, à la demande de la famille Bacci.

L'œuvre, achevée en 1466, reprend en 12 tableaux les péripéties du bout de bois sacré selon le récit de Voragine. En voici à grands traits l'histoire : à la mort d'Adam, son fils Seth sème dans sa bouche une graine dont sort un arbre. Sur ordre de Salomon, l'arbre est ensuite abattu et affecté à la construction d'un pont. Averti par la reine de Saba que ce bois serait lié à un destin funeste pour les Juifs, le roi

ordonne d'enfourer la poutre. Elle resurgit au moment de la crucifixion puis disparaît encore. Elle sera retrouvée au IV^e siècle par Hélène, la mère de Constantin, l'Empereur qui convertit les Romains au catholicisme, puis retrouvera sa place à Jérusalem, dans l'église du Saint-Sépulcre.

Dans la plupart des ciels représentés par Piero della Francesca, des nuages ont une forme inhabituelle. Il en est ainsi dans le troisième épisode (*voir la figure c*) où des hommes s'emploient à cacher le morceau de bois. Ces nuages ressemblent à des piles

L'immobilité et la forme des nuages lenticulaires expliqueraient certaines observations d'OVNI !

d'assiettes de différentes tailles et sont distincts des « moutons », des cumulus et des bandes parallèles de certains cirrus. Sont-ils le fruit de l'imagination du peintre ? Non, ils sont réalistes. Ces nuages sont des altocumulus lenticularis, aussi nommés nuages lenticulaires. Ils se forment près des montagnes, sous le vent, quand l'air prend de l'altitude pour passer l'obstacle. Lorsque les conditions sont stables, ce premier mouvement se traduit par l'apparition d'une onde stationnaire, dite orographique, en aval du relief.

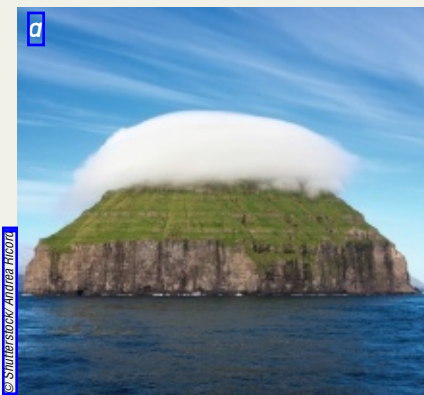
Plus précisément, l'air qui s'est élevé pour passer au-dessus des montagnes redescend sous l'effet de son poids. Cependant, quand sa densité devient inférieure à celle de l'air

environnant, la poussée d'Archimède le fait remonter. Ces deux effets opposés, ajoutés au déplacement horizontal de l'air, impriment au mouvement une oscillation dont les sommets sont distants de cinq à dix kilomètres : c'est la période spatiale de l'onde stationnaire.

Aux différents maxima de l'oscillation, en altitude, la masse d'air s'étend, se refroidit (par détente adiabatique) et peut se saturer en eau : des nuages se créent et adoptent la forme d'une lentille, voire de plusieurs lentilles empilées. C'est le cas des nuages peints par della Francesca. D'autres formes de nuages liés à des ondes orographiques sont possibles, notamment les nuages en capuchon, au sommet d'une montagne, et les allées de tourbillons dits de von Karman (*voir les figures a et b*).

Étonnamment, les nuages lenticulaires semblent immobiles, même par grand vent. En fait, ils sont alimentés en permanence par le vent du côté de la montagne et disparaissent de l'autre côté. On observe alors un nuage stationnaire quand le vent est fort. Cette immobilité apparente, associée à la forme discoïdale, fait de ces nuages des explications possibles à certaines prétendues observations de soucoupes volantes !

Arezzo étant installée au pied des « Alpes de Catenia », au Sud de la chaîne de l'Apennin septentrional, on peut imaginer que della Francesca a vu plusieurs de ces nuages lenticulaires. Les a-t-il trouvés particulièrement esthétiques au point d'en faire l'unique type de nuages dans les ciels de son cycle de fresques ? ■



IDÉES DE PHYSIQUE

Propulsions préhistoriques

Pour lancer loin, il faut lancer vite. Pour le faire à main nue ou presque, on doit mouvoir ses membres les uns après les autres.

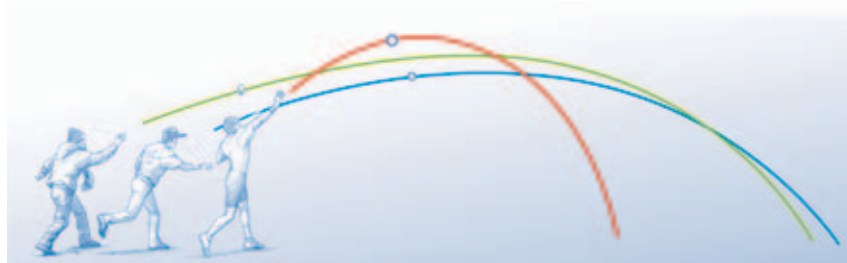
Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Comment lancer à la main un objet le plus loin possible ? Le choix de l'objet est évidemment crucial : on a l'intuition qu'il sera plus aisé de lancer loin une balle de tennis qu'une balle de ping-pong ou un parpaing. Mais la technique a aussi son importance. En observant les athlètes, on peut comprendre pourquoi il faut synchroniser les mouvements et pourquoi l'utilisation d'un accessoire tel que le propulseur à crochet rend le lancer plus efficace.

Lancer un objet tel qu'un caillou, un bâton... ou de la vaisselle est un geste naturel que nous pratiquons tous. Nous avons cependant oublié qu'il demandait un long apprentissage, car il requiert la coordination de plusieurs « segments » de notre corps. La distance qu'un objet donné peut atteindre dépend en premier lieu de sa vitesse initiale. Nos efforts musculaires doivent donc communiquer le maximum d'énergie cinétique au projectile. Il est en revanche inutile de conserver une telle forme d'énergie dans notre corps.

Comme une fusée à plusieurs étages

C'est pourquoi le geste de lancer s'apparente au décollage d'une fusée à plusieurs étages : chaque étage, après avoir accéléré l'ensemble, se sépare de la partie propulsée, de telle sorte que l'étage supérieur ait à accélérer une masse inférieure, et



1. LE LANCER D'UN PROJECTILE À LA MAIN FAIT INTERVENIR plusieurs mouvements successifs pour lui communiquer une vitesse maximale. Pour un caillou ou une balle de tennis (*trajectoires verte et bleue*), on a notamment une rotation du bras suivie d'une rotation de l'avant-bras. Pour le lancer du poids (*en rouge*), ce geste ne convient pas du tout et doit être remplacé par un dépliement du bras qui pousse le poids vers l'avant et vers le haut, le projectile étant initialement placé au niveau du cou et de l'épaule.

ainsi de suite. La charge utile de la fusée acquiert ainsi une vitesse supérieure à celle d'une fusée à un seul étage et de même force propulsive.

Un bon lanceur va ainsi mettre successivement en mouvement les différentes parties de son corps. Chacun des segments exerce sur le suivant une force (ou un couple) proportionnelle à l'accélération de ce dernier par rapport à un référentiel inertiel, c'est-à-dire par rapport au sol.

La séquence de mouvements peut commencer par le corps entier avec une course d'élan ou par une impulsion sur la jambe en retrait, puis une rotation du tronc et des épaules, la mise en rotation du bras, suivie de celle de l'avant-bras, le tout s'achevant par un éventuel mouvement du poignet juste avant que la main lâche le projectile. C'est ce que fait par exemple un lanceur de javelot.

Par composition des vitesses, la vitesse finale de l'objet sera égale à la somme des vitesses de chaque segment par rapport à celui qui le précède. La vitesse d'un caillou sera ainsi égale à la somme de la vitesse du corps par rapport au sol, de celle de l'épaule par rapport au corps, de celle du coude par rapport à l'épaule et de la vitesse de la main par rapport au coude.

Quelle est alors la vitesse maximale de lancer ? Sa valeur est limitée par la vitesse que l'on peut imprimer à une main vide. Cette dernière, déterminée par la biomécanique du corps humain, est de l'ordre d'une vingtaine de mètres par seconde, ce qui donne une portée d'environ 40 mètres en lançant le projectile avec un angle de 45 degrés. Pour un lanceur de javelot entraîné, si l'on ajoute à la vitesse de la main celle de la course du sportif, qui est de l'ordre de 6 à 8 mètres par seconde, la vitesse de lancer

atteint près de 30 mètres par seconde, d'où une portée de 90 mètres (pour un calcul précis, on doit tenir compte des forces aérodynamiques).

Les 40 mètres de portée que l'on a mentionnés laisseront songeur quiconque a jeté des pavés d'un kilogramme. Lorsqu'on augmente la masse de l'objet lancé, la vitesse obtenue n'est en effet plus celle de la main vide. La vitesse de la main est due à la rotation de l'avant-bras et correspond à la vitesse de son extrémité.

Sachant que la masse de l'avant-bras est d'environ deux kilogrammes pour un homme adulte, on peut déduire de cette vitesse l'énergie cinétique de ce segment du corps. On trouve de l'ordre de 150 joules pour une vitesse d'une vingtaine de mètres par seconde. Cette énergie, fournie par les efforts musculaires des segments précédents, se répartit désormais entre l'avant-bras et le projectile. Si ce dernier est léger (disons 100 grammes), l'avant-bras emporte presque toute l'énergie et l'objet est propulsé avec une vitesse proche de celle de la main. Sa portée théorique est alors de 40 mètres.

On a tout de même intérêt à saisir des objets assez denses et massifs pour avoir une bonne préhension et réduire l'effet des forces aérodynamiques. Mais si le projectile est lourd (disons au-delà de deux kilogrammes), c'est lui qui emporte presque toute l'énergie cinétique. Dans cette situation, le carré de sa vitesse d'éjection, et donc sa portée, décroît comme l'inverse de sa masse.

Pour un poids de cinq kilogrammes, on trouve une portée de 5,5 mètres, cela sans tenir compte de la vitesse acquise par la mise en mouvement du buste et de la hauteur initiale du projectile – paramètre négligeable lorsque la portée est grande, mais qui devient important ici. Pour une telle masse, supérieure à celle de l'avant-bras, le « dernier étage » du geste de lancer devient inefficace et même contre-productif.

Les lanceurs de poids ont donc une autre technique : après la mise en mouvement du corps et la rotation du buste et des épaules, c'est le bras entier qui se déplie, effectuant une poussée vers l'avant et vers le haut. Grâce à ce mouvement, qui permet aux muscles du bras de travailler jusqu'à la fin du lancer, les champions envoient un poids de 7,260 kilogrammes à plus de 20 mètres.

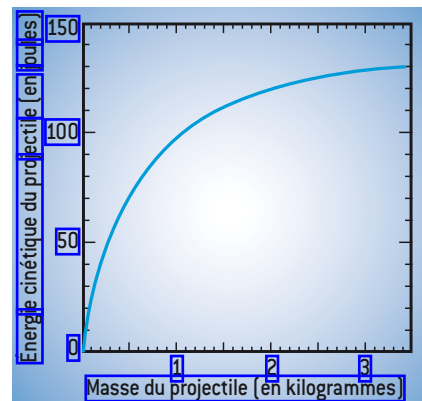
Une tige en guise d'étage de propulsion

Comment faire mieux et augmenter encore la portée d'un projectile ? Une solution est de stocker de l'énergie sous forme d'énergie cinétique, comme dans une fronde ou dans le lancer de marteau. L'objet est tenu par un lien et est progressivement accéléré : il accumule le travail musculaire avant d'être lâché. Une autre solution consiste à stocker l'énergie sous forme d'énergie élastique, comme dans l'arc ou l'arbalète. Mais quitte à se munir d'un accessoire, il

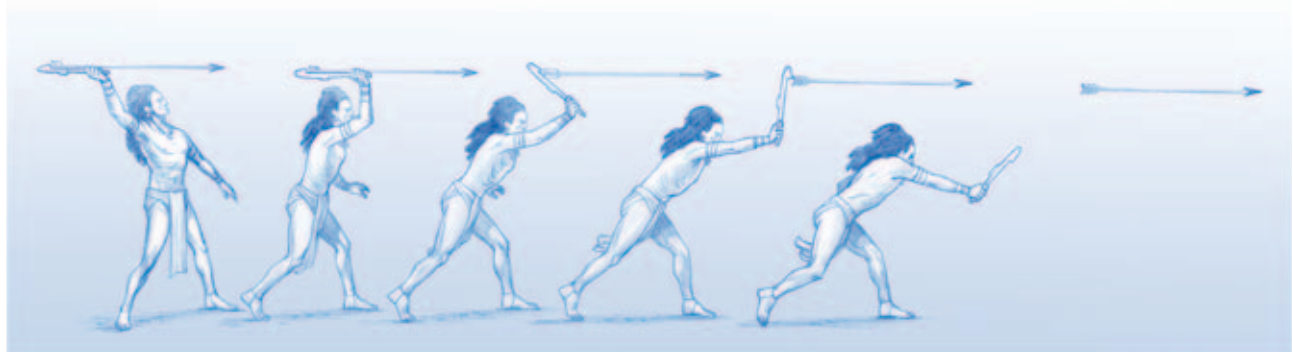
LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>



2. DANS LE LANCER d'une balle ou d'une pierre à la main, l'énergie cinétique communiquée au projectile dépend de la masse de ce dernier, à effort égal. Quand cette masse dépasse environ deux kilogrammes, l'énergie cinétique croît moins vite que la masse et le lancer devient de plus en plus inefficace. Plus précisément, le carré de la vitesse d'éjection, et donc la portée, se met à décroître comme l'inverse de la masse.



3. LE PROPULSEUR PRÉHISTORIQUE, semblable à l'atlatl des Mésoaméricains, est une sorte de levier qui constitue un étage de propulsion supplémentaire au lancer manuel. Il permet de lancer à une

vitesse élevée un projectile léger, ou de réduire l'effort nécessaire pour propulser un projectile lourd et ainsi d'assurer une meilleure précision du lancer.

BIBLIOGRAPHIE

R. Cross, **Physics of overarm throwing**, *American Journal of Physics*, vol. 72, pp. 305-312, 2004.

R. A. Baugh, **Dynamics of spear throwing**, *American Journal of Physics*, vol. 71, pp. 345-350, 2003.



Retrouvez les articles
de J.-M. Courty et E. Kierlik sur
www.pourlascience.fr

existe une technique plus simple utilisée dès la Préhistoire pour lancer des flèches ou des lances : le « propulseur » (l'atlatl des Aztèques ou le woomera des aborigènes australiens).

Il s'agit d'un levier long de 30 centimètres à 1 mètre et se terminant par un crochet, qui permet de pousser l'extrémité arrière de la lance. En prolongeant la main, cet instrument ajoute un segment à la chaîne de propulsion et met à profit l'effort musculaire que peut fournir le poignet. C'est ce que font déjà les lanceurs au base-ball, qui tiennent la balle dans les doigts et non dans la paume : ils bénéficient ainsi du mouvement de rotation du poignet, avec un bras de levier de 10 à 15 centimètres. Le propulseur accentue l'effet de ce bras de levier. Un tel lanceur de 40 centimètres a ainsi permis à des expérimentateurs

d'atteindre, pour des flèches de moins de 100 grammes, des vitesses frôlant les 35 mètres par seconde, très au-delà de celles atteintes à main nue.

Pour un projectile de 250 grammes, la vitesse de lancer dépassait les 20 mètres par seconde. Dans ce cas, le gain n'est pas spectaculaire, mais l'intérêt du propulseur ne réside pas nécessairement dans une portée accrue. Cet outil utilisé par des chasseurs ou des guerriers a pour fonction de toucher une cible : en diminuant l'effort requis pour lancer à une même distance, il autorise une meilleure précision. De plus, par rapport à un arc, il a le grand avantage d'être utilisable avec une seule main (la seconde étant alors disponible pour tenir une autre arme ou un bouclier) et d'envoyer des projectiles bien plus lourds qu'une flèche. ■



SCIENCE & GASTRONOMIE

Des goûts et des récepteurs

L'être humain perçoit la saveur du calcium et le récepteur papillaire correspondant vient d'être identifié.

Hervé THIS



Il y a plus, dans le royaume des saveurs, que les quatre classiques (sucré, salé, acide, amer) ! La réglisse n'est ni salée, ni sucrée, ni acide, ni amère. De même l'éthanol, le bicarbonate de sodium et bien d'autres composés ont une saveur spécifique, et aucun ne se réduit à une combinaison des autres. Aujourd'hui on reconnaît au calcium sa saveur. Les cuisiniers anticipaient la découverte, mais Michael Tordoff et ses collègues de l'Institut Monnell, à Philadelphie, ont confirmé les intuitions en identifiant le récepteur des ions calcium.

La théorie de l'évolution était une indication : le calcium est important pour la propagation de l'espèce (c'est un constituant essentiel des os). Pour l'avoir en suffisance, notre organisme doit le reconnaître, ce qui suppose l'existence de récepteurs. Pas des récepteurs olfactifs, les ions ne s'évaporant pas, mais des récepteurs associés aux papilles.

Les études de la fin des années 1990 avaient montré que de nombreux animaux satisfont leurs besoins physiologiques de calcium en localisant les sels de calcium et en les consommant. L'« appétit » pour le calcium est régi par la saveur : les sels concentrés de calcium sont rejetés par les animaux qui ont assez de cet élément, mais avidement consommés par ceux qui en manquent. Les études portaient sur des amphibiens, mais les résultats faisaient défaut pour notre espèce.

En quoi la cuisine avait-elle donné des indications ? Promu avec la « cuisine moléculaire », depuis le début des années 1990, l'emploi d'alginate de sodium, extrait d'algues, pour faire des gels, en présence d'ions cal-

cium, a conduit les cuisiniers à goûter ces sels, d'abord le chlorure de calcium (qui impose un rinçage, tant il est amer), puis le lactate de sodium, à la saveur plus admissible et plus originale : ni vraiment sucrée, ni acide, ni amère. Ainsi, peu à peu s'imposait l'idée d'une saveur originale des ions calcium.

Les physiologistes américains ont d'abord identifié, chez la souris, un récepteur mis en jeu dans la perception du calcium. Ils ont montré que le gène *Tas1r3*, qui code le récepteur T1R3, est associé à des préférences pour le calcium chez 40 souches de souris différentes, et que l'inactivation du gène rend les souris incapables de percevoir la saveur du chlorure de calcium. De surcroît, des enregistrements de l'activité électrique de la corde du tympan, un nerf de la langue impliqué dans le goût, ont montré que l'activité engendrée par le calcium consommé est moins importante chez les souris modifiées.

Il semblait toutefois difficile de croire que les récepteurs T1R3 étaient les récepteurs du calcium, parce qu'ils interviennent dans la saveur de sucres et du glutamate de sodium (très utilisé par la cuisine asiatique). Un composé, le lactisole, inhibe la perception de la plupart des édulcorants et du glutamate de sodium ; les physiologistes ont donc pensé que le lactisole interagissait avec les récepteurs T1R3. L'étude fut d'abord faite *in vitro*, puis avec des volontaires humains qui évaluaient l'intensité de la perception du lactate de calcium avec et sans lactisole.

Des cellules que l'on modifiait en y introduisant le récepteur T1R3 devenaient capables de réagir spécifiquement à la

présence de calcium. Mieux encore, alors que le récepteur T1R3 est une sous-unité des récepteurs de la saveur sucrée et des récepteurs de la saveur du glutamate de sodium, les cellules qui n'ont que le récepteur T1R3 et pas les autres parties des deux récepteurs ne détectent pas le sucré ou le glutamate de sodium. Par ailleurs, les volontaires entraînés pour reconnaître la saveur du calcium distinguent parfaitement les saveurs amères et acides.

Ces résultats font penser que nous reconnaissons le calcium par sa saveur originale. Pour autant, T1R3 n'est probablement pas le seul récepteur qui intervient dans la détection « sapitive » du calcium. Aurions-nous, pour d'autres ions, des récepteurs particuliers, et des saveurs spécifiques ? Le cas du magnésium est intéressant, mais les diverses espèces semblant en avoir des perceptions différentes, l'étude sera plus complexe. En attendant, nous sommes invités à goûter les eaux : leurs saveurs distinctes résultent de la présence d'ions qui ne se réduisent pas seulement à du salé, du sucré, de l'acide ou de l'amer. ■



Hervé THIS est chimiste dans le Groupe INRA de gastronomie moléculaire, professeur à AgroParisTech et directeur scientifique de la Fondation Science & Culture Alimentaire (Académie des sciences).

Retrouvez les articles de H. This sur www.pourlascience.fr



→ BIOLOGIE

Le gène généreux

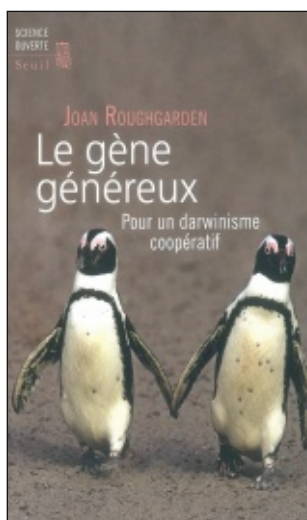
Joan Roughgarden

Seuil, 2012

[320 pages, 24 euros].

Une théorie scientifique ne rend jamais compte de la totalité d'un champ de connaissance. La théorie darwinienne de la sélection naturelle, qui repose sur la compétition pour la survie des plus aptes, est très utile à la compréhension de l'évolution. Celle de la sélection sexuelle, qui veut qu'une compétition existe aussi dans le choix des partenaires sexuels, a été très exploitée, mais, comme le fait remarquer l'auteure, reste insuffisante pour expliquer la genèse des comportements les plus complexes, notamment dans les sociétés animales.

Darwin l'avait d'ailleurs constaté lui-même, en récusant par avance l'application de ses thèses au fonctionnement des sociétés humaines (notamment dans ce que l'on a appelé le « darwinisme social »). L'auteure étend ici cette importante réserve de Darwin à l'ensemble des sociétés animales.



Car si certains modèles, souvent limités par leur réductionnisme mécaniste abusif (tels les modèles dits « sociobiologiques », pour qui la survie des gènes est le seul mécanisme pris en compte), ont pu être construits sur le « gène égoïste », des modèles beaucoup plus fructueux peuvent dériver de la métaphore que l'auteure propose dans son titre du « gène généreux ». Ainsi, une « sélection sociale » peut se faire, qui met « les gènes à distance du comportement » et qui, faisant appel à des mécanismes plus intégrés et plus plastiques (de lecture parfois ardue), donne un net bénéfice évolutif à ceux des animaux qui coopèrent, pour attraper une proie ou pour protéger leur progéniture contre des prédateurs, ou à ceux qui, chez les oiseaux, adoptent l'option « offre au mâle d'aider la femelle au nid, [qui] lui [permet] de pondre huit œufs » au lieu de trois. L'ouvrage regorge d'exemples concrets de ce type, qui démontrent le bénéfice évolutif de la coopération sociale.

« Je suis convaincue [...] que la sélection sexuelle est complètement sur une fausse piste », dit l'auteure. Mais si une théorie scientifique ne rend jamais compte de la totalité d'un champ de connaissance, il en est de même de la théorie qu'elle propose. Si je crois, pour ma part, que l'hypothèse d'un darwinisme coopératif apporte beaucoup à la compréhension de l'évolution des sociétés, je ne crois pas qu'elle amène à complètement rejeter la théorie de la sélection sexuelle, mais seulement à la nuancer et à la compléter heureusement.

À côté de la coopération et du « gène généreux » sur lesquels l'auteure insiste avec pertinence, il reste à mon avis (aussi) de la place dans l'évolution pour

« l'égoïsme, la tromperie et la hiérarchie génétique » !

→ Georges Chapouthier

Centre Émotion, USR 3246,
La Pitié-Salpêtrière, Paris

→ SCIENCES SOCIALES

L'idée même de richesse

Alain Caillé

La Découverte, 2012

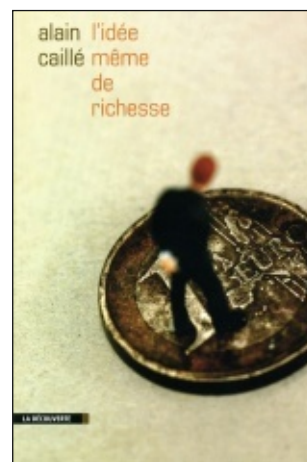
[143 pages, 12 euros].

La richesse a été généralement un objet de réflexions plus ou moins théoriques et idéologiques. Elle reste encore un sujet de questionnement très vivace de nos jours depuis la crise des subprimes en 2008. Dans son livre, Alain Caillé, professeur de sociologie et directeur du Mouvement anti-utilitariste en sciences sociales (MAUSS), explore ce qui se cache sous la notion de la richesse. Il s'interroge non plus sur la richesse proprement économique et monétaire, mais plus largement sur celle de la richesse sociale. Selon lui, ce qui rend particulièrement difficile la discussion autour de l'idée de richesse est la possibilité d'élaborer des indicateurs appropriés.

Les indicateurs actuels censés rendre compte de la richesse, le produit intérieur brut (PIB) ou encore les indicateurs dits « alternatifs », qui prennent en considération des richesses sociales et environnementales, sont insuffisants, car ils restent des indicateurs de natures macroéconomiques et quantitatives. Les nouveaux indicateurs de richesses non exclusivement marchandes, fournis par exemple par la commission Stiglitz, persistent à analyser la richesse au moyen d'indicateurs chiffrés.

De plus, la face cachée de la richesse monétaire vient, selon l'auteur, des notions aristotéliennes

imparfaites de valeur d'usage et valeur d'échange. Il préférera à ces dernières d'autres notions plus à même de reconsidérer l'importance sociale de la richesse : la valeur du lien, support du don, et la



valeur de la renommée, affirmation de notre valeur sociale. Selon A. Caillé, adepte de la théorisation du don et de l'interprétation maussienne en sciences sociales, la véritable richesse serait plutôt de l'ordre de la gratuité et de la grâce et non de celle de la nécessité. Ce type de richesse se rencontre plus spécifiquement dans le monde de l'économie sociale où les acteurs sont mus par des motivations intrinsèques. Ce livre fait suite, en effet, à des travaux de recherche susceptibles de guider les mutuelles, les coopératives ou les associations, qui sont plus à même de produire de la richesse gratuite et de la valeur sociale. Comme l'auteur le souligne lui-même, ce livre présente en fin de compte un messianisme proprement politique, « le convivialisme », dépassant ainsi les doctrines politiques actuelles tels le libéralisme ou le socialisme. Le parti pris méthodologique est de partir d'un modèle idéal qui reste à créer.

→ Valérie Lécrivain

Lab. d'anthropologie sociale, Paris

→ MATHÉMATIQUES

Petits meurtres entre mathématiciens**Tefcros Michaelides**Le Pommier, 2012
(288 pages, 17 euros).

Pour ceux qui n'ont pas eu la chance de se trouver à Paris lors du Second Congrès des mathématiciens (il s'est tenu en 1900...), il existe un moyen d'assister, comme s'ils y étaient, à la fameuse conférence que David Hilbert y a prononcée : lire le roman policier que propose Tefcros Michaelides. Les protagonistes en sont deux mathématiciens grecs. Eux, qui étaient alors jeunes, ont assisté à cette conférence. Elle fut d'ailleurs un moment déterminant de leur vie, puisque c'est à cette occasion qu'ils firent connaissance, commençant une amitié nourrie de discussions passionnées sur les fondements des mathématiques, amitié à laquelle seule la mort put mettre fin.

Enthousiastes et éblouis devant les sommités réunies au Congrès, ces débutants regardent de tous leurs yeux, écoutent de toutes leurs oreilles. Par leur intermédiaire, le lecteur, lui aussi, dévisage les mathématiciens illustres qui composent l'auditoire, perçoit leur fièvre avant l'intervention de Hilbert, dont on savait qu'elle serait marquante, assiste aux discussions après. L'auteur excelle à redonner vie aux débats de l'époque, et le lecteur s'amuse en constatant que, comme les nôtres, ils mêlaient oppositions intellectuelles loyales nourries d'estime réciproque, animosités personnelles, vexations d'amour-propre...

Les deux héros du roman n'oublient pas de profiter de la vie parisienne. Ils fréquentent des artistes marginaux, inconnus à l'époque et désargentés, ce qui

donne à l'auteur une belle occasion de croquer sur le vif cet autre milieu – et au lecteur la joie de voir un certain Pablo Picasso (l'un de ces inconnus...) se faire expliquer des mathématiques !

Nos deux Grecs sont pris dans les remous qui agitent leur pays. L'un d'eux, en 1920, est sur le point d'obtenir un poste dans une université créée en Grèce sous l'impulsion de Carathéodory (ce mathématicien, qui a laissé un nom en analyse, fut aussi un administrateur brillant). Mais, des troubles ayant éclaté en Asie Mineure, l'université ne vit jamais le jour.

Plus que les mathématiciens et les circonstances historiques, toutefois, les mathématiques elles-mêmes – et leurs questions éternelles ! – font la substance du roman. Là, je ne puis en dire plus. Non que l'auteur ait échoué à les exposer de façon compréhensible



à tous – au contraire, il y réussit fort bien. Seulement, elles éclairent le mobile du crime, donnent la clé de l'énigme.

Raconter l'intrigue d'un roman policier, cela ne se fait pas. Il se peut que Gödel ait une responsabilité morale indirecte dans le meurtre, mais chut ! j'en ai déjà trop dit.

→ Didier Nordon

→ SCIENCE ET SOCIÉTÉ

Éternit, la fibre tueuse**Gianpiero Rossi**La Découverte, 2012
(168 pages, 14,50 euros).

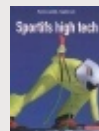
Pour dénoncer l'un des plus grands scandales sanitaires de l'histoire, celui de l'amiante, l'auteur nous fait revivre l'histoire de la petite ville italienne de Casale. Située au cœur du Piémont, la cité est entièrement dépendante, au plan économique, de l'usine de traitement de l'amiante, ouverte dans les années 1950. L'augmentation alarmante, parmi les ouvriers de l'usine, de cancers de la plèvre, le mésothéliome, est d'abord vécue comme une fatalité avant de provoquer un réveil salutaire dans la population. Journaliste à *L'Unità*, puis rédacteur en chef de l'hebdomadaire *«A»*, G. Rossi a suivi toute l'affaire et déroule pour nous ces 30 années de drames et de combats pour que soient enfin reconnues d'abord la responsabilité de l'amiante dans la survenue du mésothéliome, puis celle de la multinationale *Eternit* qui a poursuivi l'exploitation de l'usine tout en sachant les risques encourus par la population.

L'intérêt de ce livre tient autant au fond qu'à la forme. Le style narratif est fluide, souvent poignant. L'excellente traduction laisse intactes toutes les nuances des sentiments habitant les protagonistes. Tout en respectant le fil de l'histoire, l'auteur recentre le récit sur trois « lieux » symboliques, partant du plus intime pour aller au plus collectif. Une famille ordinaire, rattrapée par « l'épidémie » de mésothéliome, l'usine, Léviathan ambivalent, maudite mais seule richesse de

Brèves

PENSER LA VIOLENCE DES FEMMES**C. Cardì et G. Pruvost**
La Découverte, 2012
(442 pages, 32 euros).

On découvrira dans cet ouvrage troublant un inventaire des violences exercées par les femmes, dont l'intensité, la cruauté et la récurrence sont comparables à celles de la violence des hommes, même si cette dernière est plus ample et traditionnellement plus acceptée. L'ouvrage porte aussi sur la représentation de cette violence, que l'on dénonçait dans le passé comme aberrante, tandis que les héroïnes de cinéma aussi sexy que violentes se multiplient aujourd'hui.

**SPORTIFS HIGH TECH****N. Lanotte et S. Lem**
Belin, 2012
(160 pages, 23 euros).

Déjà entendu parler du « doping technologique » ? Depuis qu'en étudiant de près le nageur Johnny Weismüller, les coachs japonais ont transformé en cinq ans leurs petits athlètes en médaillés d'or, le sport de haut niveau est devenu affaire d'avantages techniques, qu'il s'agisse de gestuelle ou d'accessoires. Ce livre en brosse un tableau plein de science.

LA PRÉHISTOIRE DES AUTRES**Nathan Schlanger et Anne-Christine Taylor**
La Découverte/INRAP, 2012
(337 pages, 28 euros).

Inventée en Europe, la science préhistorique reste eurocentrique, de sorte que les sociétés non occidentales semblent n'avoir quitté leur préhistoire qu'avec l'arrivée des Européens. Le colloque dont est issu ce livre était un effort pour, en croisant les regards anthropologiques et archéologiques, faire éclater l'évidence que la même profondeur temporelle existe partout, quelle que soit la distance d'une culture avec sa propre préhistoire.

Brèves

**À LA RECHERCHE DE TROUVÉ**

Kevin Desmond
Pleine Page, 2012
(204 pages, 15 euros)

Tricycle électrique, oiseaux mécaniques, bateau à moteur électrique, lampe frontale, épées et bijoux lumineux sont quelques-unes des nombreuses inventions de Gustave Trouvé, touche-à-tout prolifique du XIX^e siècle. Au fil d'extraits de lettres, brevets, gravures et ouvrages d'époque, l'auteur dresse un portrait vivant de cet inventeur oublié qui a inspiré nombre d'objets modernes.

LES PLANTES ET LEURS NOMS

François Couplan
Quæ, 2012
(224 pages, 36 euros)



Ce beau livre consacré à l'étymologie des noms de plantes plaira au lecteur curieux des mots comme à celui curieux de la nature. On y découvre une parenté inattendue entre l'orchidée et l'avocat : à cause de leur forme, les orchidées tirent leur nom du terme grec signifiant testicule, et l'avocat d'un mot aztèque ayant ce même sens. On apprend aussi que la fleur de la véronique ressemble à l'empreinte du visage du Christ, d'où son nom (vraie image : *vera ikona*).

**LE CAMION ET LA POUPÉE**

Jean-François Bouvet
Flammarion/NBS, 2012
(230 pages, 19 euros)

Chercher si les différences entre les cerveaux des hommes et ceux des femmes sont d'origine naturelle ou culturelle mène l'auteur à une enquête étonnante. Par exemple, le rapport entre la longueur de l'index et celle de l'annulaire y joue un rôle inattendu. Se fondant sur des résultats récents de génétique, l'auteur conclut à une certaine sexualisation du cerveau, mais se hâte d'ajouter que celle-ci n'entraîne aucune différence d'aptitudes.

la région, enfin la ville, avec sa réalité mortifère quotidienne, mais aussi ses doutes et ses débats. Il aura fallu la pugnacité d'une poignée d'habitants pour qu'émerge une prise de conscience indignée de la réalité, s'opposant à la fatalité ambiante. Ce combat du pot de terre contre le pot de fer semblait pourtant perdu d'avance. Contre toute attente, il s'est soldé par une victoire exemplaire : le 13 février 2012, après que l'amiante est interdite sur tout le territoire italien, les dirigeants d'*Eternit* sont condamnés par le tribunal de Turin à 16 ans de prison.

Au-delà du récit, la postface pour l'édition française donne la parole aux trois principaux leaders de ce combat. Ils reviennent, avec le recul nécessaire, sur ces années de lutte et tirent des conclusions qui font écho à l'interview du procureur de Turin et d'une juge d'ins-



truction parisienne. Malgré les différences entre les systèmes judiciaires de part et d'autre des Alpes, ceux-ci élargissent le débat et tracent les voies possibles pour que de telles catastrophes environnementales et sanitaires ne puissent se reproduire : à méditer !

→ Bernard Schmitt
CERNh, Lorient

→ GÉOGRAPHIE

Paris coule-t-il ?

Magali Reghezza-Zitt
Fayard, 2012
(250 pages, 19,80 euros)

Le risque d'inondation a fait depuis une vingtaine d'années l'objet d'analyses nouvelles, tant dans la compréhension des inondations historiques que dans l'évaluation du risque dans nos métropoles contemporaines. Dans un langage qui dénote un rare talent de vulgarisation, l'auteure s'attache à rendre accessibles au grand public les questionnements savants sur la vulnérabilité de l'espace parisien aux inondations, et elle pose la question des réponses apportées face au risque de crue centennale en région parisienne.

Une crue centennale coûterait quelque 17 milliards d'euros et causerait dix fois plus de dégâts qu'en 1910. Elle immobiliserait les réseaux de transports pendant deux mois, nuirait au tourisme et l'inaccessibilité des sous-sols de la Défense et du cœur de Paris bloquerait une partie du commerce mondial. Paradoxe : « La conscience du risque reste faible alors que la mémoire du risque est forte. »

La vulnérabilité parisienne pose des questions politiques. Comment une puissance mondiale peut-elle laisser son cœur économique et culturel sous la menace d'un phénomène naturel que la densité urbaine aggrave ? Prévenir le risque par une gestion plus fine des grands réservoirs de la Seine, et par une participation plus forte des experts aux débats publics sur les plans d'amé-



nagement urbain permettrait de dépasser la « stratégie Pampers » élaborée depuis la crue de 1910. M. Reghezza-Zitt développe des idées utiles aux décideurs publics : la question de la gouvernance du risque, aujourd'hui enchevêtrée en un mille-feuille administratif et politique, qui empêche une prévention claire ; la question du choix politiquement compliqué entre protection du territoire par blocage de la densification urbaine et la poursuite du développement du tissu industriel ; la question de l'acceptation du risque par l'opinion publique, qui limiterait l'inévitable chasse aux responsabilités. À l'aide de comparaisons claires et fouillées avec d'autres catastrophes, elle plaide pour « l'adaptation au danger et au changement ». Ni catastrophisme, ni fatalisme, ni espérance en la toute-puissance de la technologie et de l'État : l'auteure en appelle à la définition publique et collective d'un « risque acceptable ».

→ Hugo Billard
EHESS, Paris



Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur :
www.pourlascience.fr