

POUR LA SCIENCE

Juillet 2014 - n° 441

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

Mémoire,
camouflage,
apprentissage

L'intelligence du poulpe



M 02687 - 441S - F: 6,20 € - RD



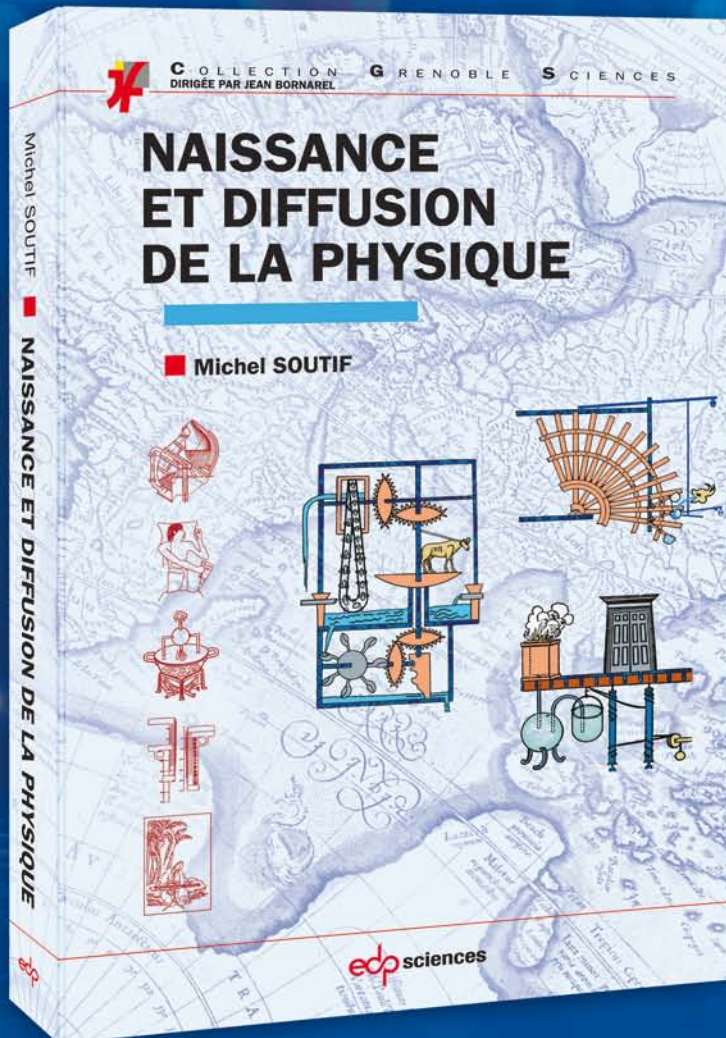
Allemagne : 9,30 € - Belgique : 7,20 € - Canada /S : 10,95 CAD - Grèce /S : 7,60 € - Guadeloupe/St Martin /S : 7,30 € - Guyane /S : 7,30 € - Italie : 7,20 € - Luxembourg : 7,20 €
Maroc : 60 MAD - Martinique /S : 7,30 € - Nlle Calédonie Wallis /S : 980 XPF - Polynésie Française /S : 980 XPF - Portugal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

GRENOBLE SCIENCES

vous présente la réédition de

NAISSANCE ET DIFFUSION DE LA PHYSIQUE de Michel Soutif

Une découverte unique de la discipline à travers les siècles



■ L'OUVRAGE

Comprendre comment la physique, science de modélisation du réel, s'est construite au fil des siècles par la confrontation entre expériences et raisonnements.

■ L'AUTEUR

Michel Soutif est un grand physicien en même temps qu'un historien d'une extraordinaire érudition dont l'écriture limpide permet d'acquérir des savoirs avec facilité et humour.

■ PUBLIC

Pour tout public désirant se cultiver sur l'évolution des sciences, des civilisations et sur la diffusion des idées.

Collection Grenoble Sciences
Livre couleur avec de remarquables illustrations
288 pages, couverture reliée

POUR COMMANDER

Cet ouvrage est en vente dans le rayon Sciences des librairies ou sur internet : <http://www.edition-sciences.com>

■ GRENOBLE SCIENCES

<http://www.grenoble-sciences.com>

Université
Joseph Fourier 
GRENOBLE

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

RhôneAlpes ^{Région}

POUR LA SCIENCE

www.pourlascience.fr

8, rue Férou - 75278 Paris cedex 06

Groupe POUR LA SCIENCE

Directrice de la rédaction : Françoise Pétry

Pour la Science

Rédacteur en chef : Maurice Mashaal

Rédactrice en chef adjointe : Marie-Neige Cordonnier

Rédacteurs : François Savatier, Philippe Ribeau-Gésippe, Guillaume Jacquemont, Sean Bailly

Dossier Pour la Science

Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin

Cerveau & Psycho

Rédactrice en chef : Françoise Pétry

Rédacteur : Sébastien Bohler

L'Essentiel Cerveau & Psycho

Rédactrice en chef adjointe : Bénédicte Salthun-Lassalle

Développement numérique : Philippe Ribeau-Gésippe

Directrice artistique : Céline Lapert

Secrétariat de rédaction/Maquette : Sylvie Sobelman,

Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy, Caroline Vanhoove

Marketing : Élise Abib et Ophélie Maillet

Direction financière et direction du personnel : Marc Laumet

Fabrication : Marianne Sigogne assistée d'Olivier Lacam.

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 :

Francesco Bonadonna, Yvan Castin, Eitan Haddok,

Martin Lemoine, Jean Nabucet, Yvan Pandelé,

Christophe Pichon, Daniel Tacquenet, Alexandra Veyrac

PUBLICITÉ France

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin

(jf.guillotin@pourlascience.fr), assisté de Nada Mellouk-Raja

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

SERVICE ABONNEMENTS

Ginette Bouffaré. Tél. : 01 55 42 84 04

Espace abonnements :

http://tinyurl.com/abonnements-pourlascience

Adresse e-mail : abonnements@pourlascience.fr

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

Commande de livres ou de magazines :

Pour la Science 628 Avenue du Grain d'Or 41350 Vineuil

DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE

Contact kiosques : À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet

Tél : 04 88 15 12 41

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

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

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

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

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in chief : Mariette DiChristina.

Editors : Fred Guterl, Ricky Rusting, Philip Yam, Mark Fischetti,

Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, Gary Stix,

Kate Wong. President : Steven Inchcoombe. Executive Vice

President : Michael Florek.

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

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

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



Transmissions

Le mot vulgarisation est critiqué par certains, car il est associé à vulgaire. D'aucuns proposent le terme popularisation, mais est-ce plus flatteur ? La notion de médiation scientifique, qui tente de s'imposer, fait plutôt référence à une animation ou une communication autour de la science. Quoi qu'il en soit, que fait le vulgarisateur ? C'est un passeur de savoir, une courroie de transmission entre le spécialiste et celui qui ne l'est pas.

L'enseignant aussi est un passeur de savoir. Il s'adresse à des élèves plus ou moins motivés, mais tenus – en théorie – d'assister aux cours. Au contraire, le vulgarisateur s'adresse à des lecteurs *a priori* motivés, mais que rien ne contraint à acheter un magazine. S'ils sont séduits par le fond et la forme, sans doute achèteront-ils le numéro suivant, voire – espoir de tout éditeur de presse – s'abonneront-ils.

Sans fausses promesses, sans sensationnalisme

Sans effets de manches, sans simplification excessive, sans fausses promesses, sans sensationnalisme, le vulgarisateur conte la science qui se construit, pas à pas, parfois piétine ou fait fausse route. Et s'il expliquait, mais surtout cherchait à donner l'envie de comprendre, à attiser la curiosité, susciter des vocations, établir des passerelles entre les disciplines, faire en sorte que la culture scientifique retrouve sa place dans la culture générale ?

Pour expliquer, le journaliste scientifique doit d'abord comprendre... au moins la mousse des choses. Travail exigeant, réclamant rigueur, honnêteté intellectuelle et esprit critique pour distinguer une découverte importante d'une annonce faite par un bon communicant. Mais surtout travail passionnant. Possible parce que les chercheurs, considérant que la diffusion des connaissances scientifiques fait partie de leur mission, acceptent de présenter les résultats de la recherche en se pliant aux contraintes de la vulgarisation. Possible aussi parce que des lecteurs apprécient les informations scientifiques sélectionnées, validées, mises en perspective, loin de l'instantanéité des flux d'informations disponibles sur Internet.

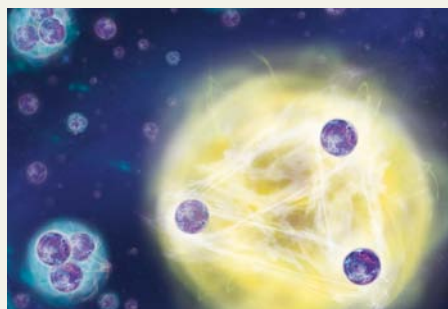
Pourquoi ce petit texte sur la vulgarisation scientifique ? Pour donner à entrevoir le travail de l'équipe de *Pour la Science* et la façon dont est élaboré ce magazine. Et parce que cette équipe va continuer à porter le flambeau que je leur transmets avec mon dernier éditorial dans ces colonnes ! ■

Françoise Pétry directrice de la rédaction

1 **Édito**

Actualités

- 4 **Naïa, jeune première Américaine**
- 6 **Des micro-organismes se jouent du code génétique**
- 8 **Des systèmes triatomiques géants**



9 **Une biopile inusable**

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

12 **Point de vue**
Pour une économie morale des gènes
Maurice Cassier

14 **Questions ouvertes**
Qu'est-ce que la chimie verte ?
Laura Maxim

18 **Homo sapiens informaticus**
Les avatars du Docteur Diafoirus
Gilles Dowek

20 **Cabinet de curiosités sociologiques**
Les Simpson savaient-ils ?
Gérald Bronner

21 **Lu sur SciLogs.fr**
Peut-on ressusciter des espèces ?
Vincent Devictor



Ce numéro comporte deux encarts d'abonnement à *Pour la Science* : l'un est consacré à la totalité du tirage, ainsi qu'un encart « Voyage culturel en Turquie » (Dialogue Marketing) posé sur la totalité de diffusion abonnés
En couverture : © fullerko/shutterstock.com

À LA UNE

22

ÉTHOLOGIE

L'intelligence des céphalopodes

L. Dickel et A.-S. Darmaillacq

Poulpes, seiches et calmars sont bien plus que les maîtres du camouflage. Mémoire, apprentissage, innovation, jeux... Dans de nombreux domaines, ils n'ont rien à envier à certains vertébrés.



30

SCIENCE DES MATÉRIAUX

Le silicène sur les traces du graphène

Guy Le Lay

Le silicène est un nouveau matériau constitué d'une unique couche d'atomes de silicium. Parce qu'il allie les caractéristiques de cet élément et les propriétés électroniques du graphène, il pourrait conduire à de nombreuses applications.

38

ASTROPHYSIQUE

La fin de l'âge sombre

Michael Lemonick

Après l'émission du rayonnement du fond diffus cosmologique, l'Univers a progressivement été plongé dans l'obscurité jusqu'à l'apparition des premières étoiles. À quoi ressemblaient ces astres et quand sont-ils apparus ?

46

PSYCHOLOGIE

Mémoire: un effet Google ?

Daniel Wegner et Adrian Ward

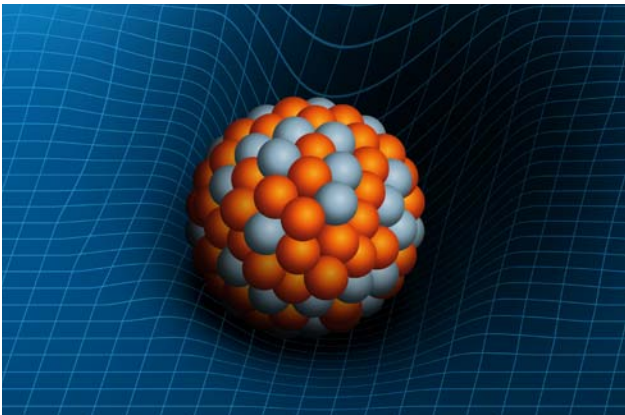
Les gens ont depuis toujours compté les uns sur les autres pour mémoriser et retrouver les informations qui leur sont utiles. Aujourd'hui, on s'en remet souvent à Internet, ce qui influe sur la mémorisation et sur la perception de soi.

50 **MATHÉMATIQUES****Les notes de Ramanujan, un trésor inépuisé***Ariel Bleicher*

Au début du XX^e siècle, le prodige indien Srinivasa Ramanujan a couvert plusieurs carnets de résultats mathématiques étonnants. Les mathématiciens s'en inspirent encore pour faire de nouvelles découvertes.

56 **PHYSIQUE****Le principe d'équivalence à l'épreuve quantique***Domenico Giulini*

L'égalité entre la masse qui mesure l'inertie et la masse qui détermine la gravitation est au fondement de la relativité générale d'Einstein. Une expérience récente censée la tester sur des objets quantiques divise les spécialistes.

64 **ÉNERGIE****Énergies renouvelables : l'essor sera lent***Vaclav Smil*

Beaucoup espèrent un passage rapide aux énergies renouvelables. Mais l'histoire des transitions énergétiques montre qu'elles nécessitent deux à trois générations.

**Rendez-vous**72 **Histoire des sciences****Coriolis, théoricien de la mécanique appliquée***Alexandre Moatti*

La force de Coriolis, cause de la rotation des vents sur la Terre, est célèbre, contrairement à l'ingénieur-savant qui lui a donné son nom.

76 **Logique & calcul****Un tour de cartes mathématique***Jean-Paul Delahaye*

Pour réussir un bon tour de cartes, il faut être agile de ses mains... ou alors connaître les suites de de Bruijn.

82 **Science & fiction****Des aliens pas si rapides***Roland Lehoucq et J. Sébastien Steyer*84 **Art & science****L'ADN fait bonne figure***Loïc Mangin*86 **Idées de physique****Le réfrigérateur qui transpire***Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik*90 **Question aux experts****Percevons-nous des informations à notre insu ?***Sylvie Chokron*91 **Science & gastronomie****Goûts thermiques en bouche***Hervé This*92 **À lire**96 **Bloc-notes****Les chroniques de Didier Nordon****POUR LA SCIENCE****Maintenant sur tablette et sur smartphone !**

Téléchargez gratuitement
l'application « Pour la Science »

Un extrait du numéro
en cours de parution
vous est offert !



Le numéro du
Dossier Pour la Science
de l'été est enrichi

disponible sur
Google play

disponible sur
App Store

SCIENCE



Le squelette Naïa au moment de sa découverte dans une grotte immergée du Yucatán (a, b). Les chercheurs ont immédiatement numérisé la forme du crâne sur une table spéciale (c).

Paléontologie humaine

Naïa, jeune première Américaine

La découverte d'un squelette humain bien conservé dans une grotte mexicaine submergée confirme, une fois de plus, les origines eurasiatiques des premiers habitants de l'Amérique.

Dans le Yucatán, au Mexique, l'eau coule seulement au fond des grottes. Naïa devait avoir 15 ans quand elle fit la même erreur qu'un mastodonte, un félin à dent de sabre, un tapir et un ours avant elle : croyant pouvoir étancher sa soif, elle s'aventura sur plus de 600 mètres dans une grotte nommée *Hoyo Negro*, s'y perdit et finit par tomber et mourir au fond d'une vaste salle souterraine. Treize millénaires plus tard, le squelette de cette jeune femme, que ses découvreurs ont nommée Naïa, confirme que les tout premiers Américains provenaient de Béringie.

Cette région située entre l'Eurasie et l'Amérique, immergée aujourd'hui, était en effet à découvert durant le dernier maximum glaciaire, il y a quelque 20 000 ans. Selon la théorie dominante sur le peuplement des Amériques, il y a entre 26 000 et 18 000 ans, des

groupes de chasseurs-cueilleurs eurasiatiques – européïdes ou mongoloïdes – qui vivaient en Béringie sont passés en Amérique. Toutefois, l'étude anatomique des plus anciens restes américains suggérait que ce continent avait aussi été peuplé par une vague africanoïde plus ancienne (type partagé par les Océaniens, les Aborigènes et les Africains).

Les plongeurs du projet *Hoyo Negro* ont découvert Naïa sous les 25 mètres d'eau qui ont envahi la grotte depuis la déglaciation, il y a au moins 4 000 ans. Presque complet, ce squelette d'une jeune femme de 1,5 mètre et âgée de 15 à 16 ans la rend comparable à tous les fossiles paléoaméricains anciens et aux fossiles du Paléolithique supérieur du Nord de l'Eurasie. Sa datation indique que Naïa est morte il y a entre 12 000 et 13 000 ans. Le modèle numérique de son crâne a ainsi

permis d'établir que les traits de sa face ressemblent à ceux des autres fossiles américains anciens et des fossiles du Paléolithique supérieur d'Eurasie (40 000 à 10 000 ans avant notre ère).

Cependant, certaines caractéristiques de la dentition de Naïa la distinguent des Amérindiens actuels et la rapprochent des Océaniens.

Et que dit son ADN ? Tout le contraire. L'équipe américaine de James Chatters n'a pas pu retrouver de collagène dans les os de Naïa. En revanche, dans l'ADN que les chercheurs ont extrait de la troisième molaire supérieure, ils ont isolé de nombreux fragments d'ADN mitochondrial (qui se trouve dans les mitochondries, de petits organites des cellules, et qui est transmis par les femmes seulement).

Le séquençage de cet ADN et sa reconstitution ont fait apparaître que Naïa était porteuse d'un groupe de gènes se transmettant de conserve, le sous-haplotype D1, qui dérive

du haplotype asiatique D, mais qui n'est présent que chez les Amérindiens – et ce d'autant plus qu'ils vivent au Sud (29,5 pour cent des Amérindiens du Chili et d'Argentine en sont porteurs, contre 10,5 pour cent en moyenne sur toute l'Amérique).

Cette constatation suggère que Naïa faisait partie de la population ayant apporté le sous-haplotype D1 en Amérique du Sud. En d'autres termes, comme les Amérindiens modernes, la jeune femme descend des Béringiens. C'est un indice fort de plus en faveur d'une origine uniquement béringienne des premiers humains d'Amérique. Les traits anatomiques qui distinguent les premiers Amérindiens de ceux d'aujourd'hui seraient donc le fruit d'une évolution postérieure à leur arrivée en Amérique et non un héritage dû à une mystérieuse vague de peuplement africanoïde.

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

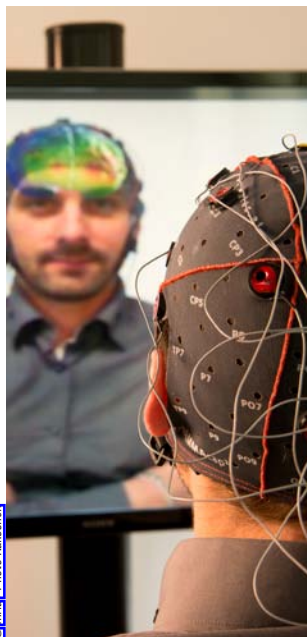
Suivez les dernières actualités de Pour la Science sur les réseaux sociaux

François Savatier

J. C. Chatters et al., *Science*, vol. 344, pp. 750-754, 2014

Neurosciences

Voir son propre cerveau fonctionner



Mélangez un jeu vidéo de réalité augmentée avec l'imagerie cérébrale et vous obtenez *Mind-Mirror*, le premier système qui vous permet de voir l'activité de votre cerveau pendant que vous faites un calcul ou que vous vous détendez, par exemple. On projette l'image de votre buste sur un écran grâce à une caméra vidéo qui vous filme en permanence, on y superpose en transparence l'image virtuelle d'un cerveau – c'est le principe de la réalité augmentée – et on ajoute l'activité de votre propre cerveau mesurée en temps réel par le casque d'électroencéphalographie (EEG) que vous portez. C'est le dispositif que Anatole Lécuyer et ses collègues, de l'Inria et de l'INSA à Rennes, ont mis au point et qu'ils

espèrent utiliser dans le domaine du *neurofeedback*, une technique de soin où le sujet observe son cerveau pour mieux le contrôler.

Selon notre état mental, nos pensées, notre attention, etc., l'activité électrique mesurée par EEG varie. Le *neurofeedback* consiste à visualiser cette activité pour la moduler et traiter ainsi certains troubles dépressifs ou de l'attention. Le dispositif *Mind-Mirror* fournirait au patient des informations très riches : son activité cérébrale est reconstruite en temps réel et projetée sur son « cerveau virtuel » affiché à l'écran. Le patient a alors l'impression de voir fonctionner son cerveau, ce qui peut l'aider à mieux le maîtriser.

Bénédicte Salthun-Lassalle

J. Mercier-Ganady et al., *IEEE*, en ligne, avril 2014

Houle contre banquise

La houle engendrée par les tempêtes disloque la banquise jusqu'à plus de 100 kilomètres du bord, bien plus loin qu'on ne le pensait. C'est ce qu'affirment Alison Kohout et ses collègues. Cette équipe néo-zélandaise a comparé les positions du bord de la banquise antarctique et les variations de la hauteur de houle dans l'océan Austral entre 1997 et 2009. Pour une houle de plus de trois mètres, l'amortissement serait proportionnel à la distance, et non exponentiel comme prévu.

Dilemme de diptère

Comme les humains, les mouches délibèrent avant d'effectuer un jugement perceptif : elles pèsent les décisions difficiles plus longuement que les autres. C'est ce qu'ont montré Shamik DasGupta et ses collègues, à l'Université d'Oxford, en incitant des drosophiles à choisir entre plusieurs odeurs. Ils ont également observé qu'une mutation du gène *FoxP*, dont les gènes homologues chez l'homme sont liés au développement cognitif et à la prise de décision, provoquait de l'indécision chez les mouches.

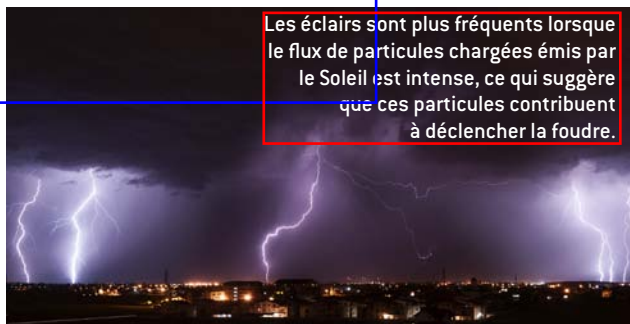
Météorologie

Le vent solaire favorise les éclairs

Les facteurs qui déclenchent les éclairs sont encore mal connus. Une étude menée par l'équipe de Christopher Scott, de l'Université de Reading au Royaume-Uni, pointe aujourd'hui un coupable : les particules énergétiques émises par le Soleil.

Dans un nuage d'orage, sans doute sous l'effet de collisions entre ses constituants, le sommet se charge positivement tandis que la base se charge négativement. Une différence de potentiel pouvant atteindre 100 millions de volts se crée entre le bas du nuage et le sol. Mais l'air étant un bon isolant, pour qu'un éclair se produise, il faut d'abord que se forme un chemin de molécules ionisées, qui agit comme un conducteur et amorce la décharge.

Qu'est-ce qui provoque cette ionisation initiale ? Peut-être les particules du vent solaire rapide. Le Soleil émet en permanence un flux de particules chargées. Les plus énergétiques (des pro-



Les éclairs sont plus fréquents lorsque le flux de particules chargées émis par le Soleil est intense, ce qui suggère que ces particules contribuent à déclencher la foudre.

tons) peuvent pénétrer le champ magnétique terrestre et parvenir à l'altitude où les orages se forment. En percutant les molécules de l'air, ces protons engendreraient en cascade une gerbe d'électrons, suffisante pour amorcer un éclair.

Pour vérifier cette hypothèse, Ch. Scott et ses collègues ont comparé la fréquence des éclairs dans une région de 500 kilomètres de rayon au-dessus de l'Angleterre entre 2000 et 2005 avec les pics d'émission de vent solaire rapide, donc énergétique, mesurés sur la période par le satellite ACE de la

NASA (ces pics sont au nombre de 532).

L'analyse révèle une augmentation notable de la fréquence des éclairs dans les 40 jours qui suivent l'arrivée de vent solaire rapide (422 éclairs par jour en moyenne, contre 321 avant), et ce indépendamment des variations saisonnières.

Si ce lien s'avérait, on pourrait à terme prévoir le risque d'éclairs en fonction de la météo solaire.

Philippe Ribeau-Gésippe

C. J. Scott et al., *Environ. Research Letters*, vol. 9(5), 055004, 2014

Des nucléotides artificiels

L'équipe de Floyd Romesberg, à l'Institut de recherche Scripps, aux États-Unis, est parvenue à ajouter une nouvelle paire de bases dans l'ADN d'une bactérie. En sus des nucléotides usuels A, T, G et C, l'alphabet génétique de cet organisme semi-synthétique a ainsi été enrichi de deux nouvelles lettres, X et Y. Les biologistes ont montré que si ces nucléotides artificiels ne codent (encore) rien, ils sont répliqués par la bactérie lors de sa division et se transmettent de façon stable au fil des générations. Une prouesse qui marque une étape de plus pour la biologie de synthèse.

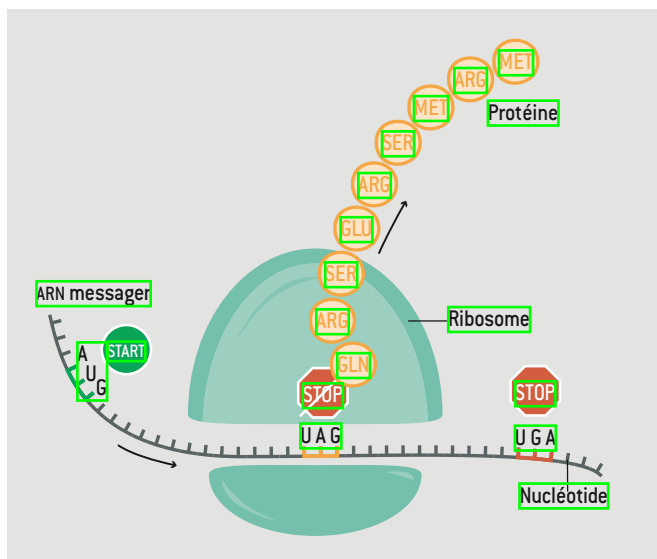
Microbiologie

Des micro-organismes se jouent du code génétique

Une étude métagénomique a montré que de nombreux micro-organismes réinterprètent les instructions « stop » du code génétique, lequel se révèle moins universel qu'on ne le pensait.



Le décodage d'un gène (ci-dessus un exemple de séquence d'ADN) s'effectue grâce à la traduction de son ARN messager en protéine, qui commence au codon start et s'interrompt lorsqu'un codon stop est rencontré. Dans l'exemple de codage alternatif ci-contre, le codon stop UAG (ou *ambre*) est réassigné : il n'est pas interprété comme une instruction d'arrêt, mais code l'acide aminé glutamine, qui sera incorporé à la protéine en cours de synthèse.



Depuis sa découverte dans les années 1960, le code génétique est en général considéré comme commun à tous les organismes. Même si des exceptions ont depuis été découvertes – dans les mitochondries et chez quelques organismes unicellulaires comme les ciliés –, il est encore largement admis qu'elles ne constituent que des variations sur un thème universel.

Selon Natalia Ivanova et ses collègues du Joint Genome Institute (JGI), un centre de séquençage près de San Francisco, ces modifications sont pourtant plus fréquentes que prévu. En analysant les métagénomes de près de 1800 échantillons, ces chercheurs ont trouvé qu'un nombre notable de séquences correspondent à un code génétique modifié, notamment chez les bactéries d'eau douce ou issues de prélèvements chez l'homme.

Le code génétique établit la correspondance entre les triplets de nucléotides – ou codons – et les acides aminés, les constituants des protéines. Parmi les 64 codons

existants, certains signalent la fin du gène lors de sa traduction : ce sont les trois codons *stop* dénommés *ambre*, *opale* et *ocré*. Le codage alternatif identifié par les chercheurs repose sur la réassignation d'un ou plusieurs de ces codons *stop*, qui codent alors non pas une instruction d'arrêt, mais un acide aminé.

N. Ivanova et ses collègues ont aussi détecté plusieurs de ces codages alternatifs chez des phages, ou virus de bactérie. Chez un phage issu d'un prélèvement lingual chez l'homme, ils ont montré l'existence d'une stratégie d'infection inédite, surnommée « guerre des codons ». Le phage, où le codon *ambre* est réassigné, s'attaque à une bactérie qui réassigne le codon *opale*. En exprimant une protéine qui force l'interprétation d'*opale* comme un codon *stop* classique, il perturbe l'expression des gènes de son hôte et favorise son propre codage alternatif.

« Ce mode d'infection fonde sur la manipulation du code génétique est tout à fait original et inattendu », commente Jean

Deutsch, professeur émérite à l'Université Pierre et Marie Curie. Pour Eddy Rubin, coauteur de l'étude et directeur du JGI, cette découverte bouscule la conception, jusque-là dominante, selon laquelle virus et hôtes doivent partager le même code génétique.

Récemment, des chercheurs américains ont proposé d'utiliser le recodage des codons *stop* pour empêcher le transfert d'information génétique des bactéries génétiquement modifiées à leur environnement. Mais cette idée semble mise à mal. « La réassignation de codons *stop* ne constitue pas un pare-feu étanche », indique Volker Döring, qui travaille à la mise au point d'organismes synthétiques au Genoscope d'Évry. « Même lorsque le codage est classique, l'arrêt de la traduction est un processus qui n'est pas totalement déterministe. Pour empêcher la contamination, l'incorporation de bases artificielles à l'alphabet génétique est une piste plus prometteuse. »

Yvan Pandelé

Science, en ligne le 22 mai 2014

99

pour cent

des micro-organismes

ne sont pas cultivables

en laboratoire. L'analyse

génomique de cette

« matière noire

microbienne » ne fait

que commencer.

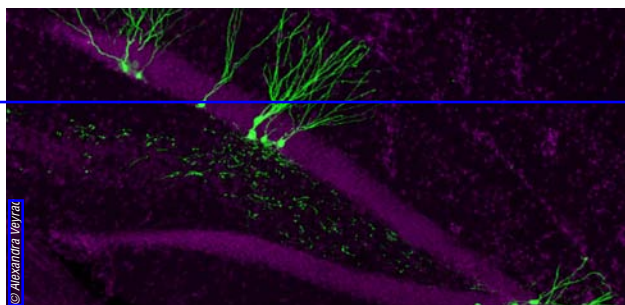
Neurobiologie

Pourquoi oublie-t-on ses souvenirs d'enfance ?

Vous souvenez-vous de vos premiers pas ? Sans doute pas. Comme de nombreux animaux, l'homme oublie presque tout de son vécu infantile. Selon une étude réalisée sur des rongeurs par Katherine Akers et ses collègues de l'Hôpital pour les enfants malades, à Toronto, cet oubli résulte en partie de la formation importante de nouveaux neurones (ou neurogenèse) pendant l'enfance, en particulier dans l'hippocampe, une aire cérébrale essentielle à la mémorisation.

Dans le cerveau, un souvenir est codé par un réseau de connexions neuronales renforcées ou affaiblies. Dès lors, la formation de nouveaux neurones, qui établissent des connexions avec les anciens, risque de perturber les réseaux existants. Ainsi, des simulations sur ordinateur suggèrent qu'elle efface certains souvenirs.

C'est cette hypothèse qu'ont testée les neurobiologistes à travers une série d'expériences. Ils ont fait mémoriser une « peur liée au contexte » à des rongeurs en leur administrant un léger choc élec-



De nouveaux neurones (en vert, ici chez la souris adulte) s'intègrent tous les jours dans le gyrus denté de l'hippocampe (partie violette en forme de V incliné). Ils favorisent la formation de nouveaux souvenirs, mais aussi l'oubli des anciens en perturbant les réseaux préexistants.

trique à la patte en présence d'un certain décor. Certains animaux fabriquaient plus de nouveaux neurones que d'autres, pour diverses raisons : soit ils étaient plus jeunes, soit la neurogenèse était stimulée par un exercice physique ou des substances pharmacologiques, soit les espèces différaient. Les chercheurs ont alors constaté que plus la neurogenèse est importante, plus les rongeurs oublient vite la peur conditionnée.

Cependant, selon Alexandra Veyrac, du Centre de recherche

en neurosciences de Lyon et du Centre de neurosciences Paris-Sud, le lien entre neurogenèse et oubli doit être étudié plus avant : des expériences chez les rongeurs montrent que ces derniers se souviennent toute leur vie d'odeurs apprises dès le plus jeune âge, alors que le bulbe olfactif (qui intervient dans la mémorisation des odeurs) est aussi le siège d'une neurogenèse après la naissance.

Guillaume Jacquemont

K. Akers et al., *Science*, en ligne le 8 mai 2014

L'œil de Jupiter se ferme

La grande tache rouge de Jupiter, cet anticyclone géant visible à la surface de la planète, serait en train de fondre à vue d'œil. Lorsqu'on l'a observé pour la première fois, à la fin du XVIII^e siècle, l'« œil de Jupiter » faisait plus de 40 000 kilomètres de diamètre. D'après les données du télescope spatial *Hubble*, il ne mesure plus aujourd'hui que 16 000 kilomètres. On ignore la cause de ce rétrécissement, mais, au rythme actuel, Jupiter pourrait perdre son œil d'ici 2030.

Troubles en eaux froides

Selon les chercheurs américains Whitman Miller et Gregory Ruiz, le risque de transport d'espèces invasives des régions froides augmente avec la fonte de la banquise arctique. Des passages entre les océans Atlantique et Pacifique s'ouvrent en effet par le Nord, et des animaux s'accrochent aux coques des navires ou sont présents dans les eaux de ballast. Jusqu'à présent, le passage par les eaux chaudes des canaux de Suez ou de Panama limitait la survie de ces espèces et leur diffusion.

Archéologie

La première farine de Guédelon

De l'eau qui court, deux roues de bois, un engrenage, une tige de fer, deux quintaux de pierre, et à la fin une machine moins puissante qu'un sèche-cheveux : une équipe du projet d'archéologie médiévale expérimentale de Guédelon, en Bourgogne, vient de reconstruire à l'identique un moulin médiéval retrouvé quasi intact.

En 2007, au cours des fouilles qui précèdent la construction de la ligne à grande vitesse Dijon-Mulhouse, une équipe de l'INRAP dirigée par Gilles Rollier découvre un moulin du VIII^e siècle. Ses 189 pièces, c'est-à-dire presque toutes, sont bien conservées dans

les terres saturées d'eau d'un ancien chenal. Pierre Mille, qui a participé à la fouille, vient d'aider les charpentiers de Guédelon à reproduire le moulin. Installé sous une petite maisonnette comportant un étage où tournera la meule, son mécanisme comprend essentiellement six pièces : une roue à 28 aubes, solidaire de l'arbre de couche (un axe couché), lui-même solidaire du rouet (roue dentée), dont les dents s'engrènent entre les barreaux de bois d'une lanterne (engrenage) pour la faire tourner, et, avec elle, l'axe de fer qui entraîne la meule. Le coursier, un canal de bois légèrement pentu, amène l'eau à la roue hydraulique.

Le moulin produit aujourd'hui de la farine d'épeautre, mais les frottements qui accompagnent sa marche font branler la maisonnette qui l'abrite ! La meule accomplit 25 tours par minute, de sorte qu'une longue mise au point sera nécessaire pour obtenir les 40 souhaités. Les calculs montrent que la puissance de la machine ne dépasse pas un kilowatt. Pourtant, ses pales faites de planches et de tenons, plus larges que les pales d'une seule pièce de bois des moulins du Haut Moyen Âge, trahissent une volonté de puissance !

F. S.

www.guedelon.fr

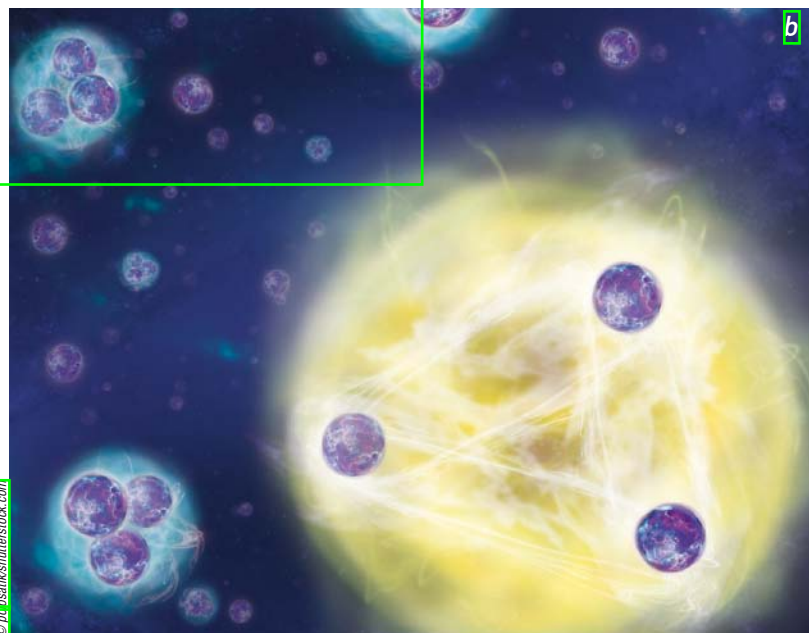
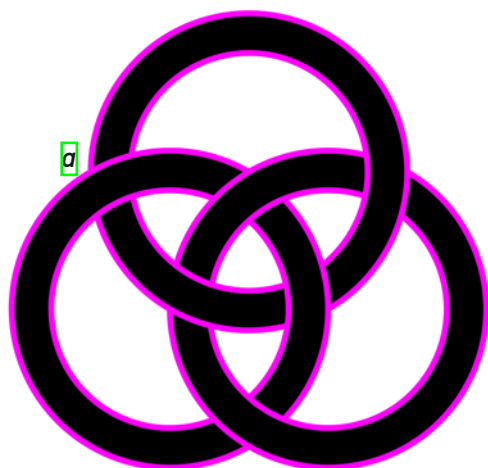


Le mécanisme du moulin, avec notamment sa roue à aubes (premier plan) et sa meule (dans une caisse à l'étage) sous une trémie pleine de grain.

Physique

Des systèmes triatomiques géants

Les « états d'Efimov » correspondent à des systèmes où trois atomes identiques sont liés. Certaines de leurs propriétés viennent d'être confirmées par l'expérience.



On compare souvent les états d'Efimov aux anneaux borroméens (a). Ces trois cercles enlacés figurent sur les armoiries d'une puissante famille italienne du XV^e siècle, les Borromeo, d'où leur nom. Si l'on ôte un anneau, les deux autres ne sont plus liés. Il en va de même des atomes dans les états d'Efimov : le système n'est lié que parce que trois atomes sont en présence. La vue d'artiste (b) représente l'état fondamental (à gauche) et le premier état excité (à droite).

Lorsque deux atomes identiques ne s'attirent pas assez pour se lier, la venue d'un troisième atome peut créer un trio stable. Ce phénomène d'origine quantique a été prédit par le physicien russe Vitaly Efimov en 1970. Il fallut attendre 2006 pour que le premier état d'Efimov soit observé, grâce aux progrès dans le domaine des atomes ultrafroids. Mais parmi les propriétés que le théoricien avait prévues, il restait à montrer que les systèmes triatomiques de ce type existent dans des états excités. Découvreur du premier état d'Efimov, Rudolf Grimm, de l'Université d'Innsbruck, et son équipe ont maintenant mis en évidence le premier état excité d'Efimov et confirmé certaines de ses caractéristiques.

La difficulté expérimentale est grande. La formation d'états d'Efimov exige que la probabilité de collision entre particules soit importante à basse énergie – une situation nommée résonance de Feshbach. Une fois les trimères formés, ils restent très fragiles : l'énergie de liaison est si faible que le trio peut se dissocier

facilement. En 2006, R. Grimm et ses collègues avaient utilisé des atomes de césium à quelques centaines de nanokelvins pour former des trimères dans l'état d'Efimov fondamental, dont la taille est d'environ 50 nanomètres.

D'après la théorie de V. Efimov, le premier état excité a la même forme que l'état fondamental, mais sa taille est multipliée par un facteur d'environ 22,7. Pour le césium, cela implique un premier état excité ayant une taille de l'ordre d'un micromètre, soit la taille d'une bactérie. Mais l'énergie de liaison entre les atomes étant divisée par le même facteur élevé au carré, il fallait abaisser la température à quelques nanokelvins pour espérer l'observer.

R. Grimm et son équipe ont ainsi utilisé un ensemble de 30 000 atomes de césium refroidis à 7 nanokelvins et maintenus dans un piège magnétique. Ils ont ensuite fait varier le champ magnétique afin de se rapprocher continûment des conditions de la résonance de Feshbach et de faire ainsi apparaître des états d'Efimov. Lorsqu'on est au seuil de l'apparition de tels états, la

probabilité de trouver trois atomes proches dans le gaz augmente fortement, ce qui augmente les chances de collisions à trois corps. Or ces collisions confèrent parfois une grande vitesse à certains des atomes, qui s'échappent alors du piège. La formation d'états d'Efimov s'accompagne donc d'un pic de fuite d'atomes. En notant pour quelle valeur du champ magnétique ce pic se produit, les physiciens ont déduit les caractéristiques du premier état excité d'Efimov. Ils trouvent que le trimère correspondant a une taille 21 fois supérieure à celle du trimère dans l'état fondamental, un résultat en accord avec les prévisions théoriques compte tenu des incertitudes de mesure.

La théorie d'Efimov serait universelle et permettrait par exemple de décrire le noyau de lithium 11, constitué d'un groupe compact de nucléons et de deux neutrons plus éloignés, et bien d'autres systèmes atomiques ou nucléaires.

Sean Bailly

B. Huang et al., Phys. Rev. Lett., vol. 112, 190401, 2014

Astronomie

Une seconde vie pour Kepler

Le satellite chasseur d'exoplanètes *Kepler* est sur le point de connaître une seconde vie. Lancé en mars 2009, *Kepler* a découvert plus de 3800 candidats au titre de planète extrasolaire par la méthode des transits (qui consiste à détecter la baisse de luminosité périodique due au passage d'une planète devant son étoile), dont près d'un millier ont déjà été confirmés.

Mais en mai 2013, une deuxième des quatre roues gyroscopiques est tombée en panne, rendant impossible une stabilisation suffisante de l'instrument pour poursuivre la mission.

Les ingénieurs de la NASA ont cependant imaginé un moyen de tirer parti du télescope diminué : positionné parallèlement à la direction de son orbite autour du Soleil, le vaisseau sera équilibré selon un axe grâce à la pression exercée par... la lumière du Soleil ! Avec les deux gyroscopes restants, il pourra alors pointer un nouveau champ.

La sensibilité (300 parties par million) et le nombre d'étoiles observées (10 à 20 000) seront certes dix fois inférieurs à ce qu'ils étaient auparavant, et les plages d'observation en continu ne dépasseront pas 80 jours, mais cette nouvelle mission, nommée K2, devrait permettre à *Kepler* de continuer à découvrir des exoplanètes. Elle vient d'être approuvée pour deux ans.

Ph. R.-G.

<http://keplerscience.arc.nasa.gov/K2/>

Insolite

Une Vénus accroupie

La volage Vénus a trompé Vulcain avec Mars et se cache. Elle est dénoncée par une vieille femme, que la déesse courroucée pétrifie... Or les archéologues de l'INRAP viennent de mettre au jour à Pont-Sainte-Maxence, dans l'Oise, le visage pétrifié de la délatrice. Il figurait sur la frise écroulée d'un vaste temple gallo-romain du II^e siècle, fouillé en urgence avant l'érection d'un temple de la consommation (un supermarché). À ses côtés, la déesse est accroupie... et se cache encore !



INRAP - Pont-Sainte-Maxence

Techniques médicales

Une biopile inusable

Une pile fonctionnant au glucose, susceptible d'alimenter divers dispositifs médicaux implantables, a été sélectionnée par l'Office européen des brevets pour la finale du Prix de l'inventeur européen. Philippe Cinquin nous présente l'appareil, fruit de la collaboration entre son laboratoire et celui de Serge Cosnier, tous deux rattachés à l'Université Joseph Fourier et au CNRS.

Comment fonctionne votre biopile ?

Philippe Cinquin : C'est une pile à combustible, comme une pile à hydrogène, sauf que le carburant est ici le glucose présent dans l'organisme (dans le liquide extracellulaire ou le sang). Elle comporte deux électrodes, obtenues par compression d'enzymes et de matériau conducteur. Des électrons sont arrachés au glucose par les enzymes de l'anode, puis ils circulent dans un fil conducteur et traversent le dispositif à alimenter, avant de réduire l'oxygène en eau au contact de l'autre électrode.

Les électrodes sont encapsulées dans deux membranes semi-perméables. La première évite la fuite des enzymes et laisse entrer les molécules de glucose (bien plus petites). La seconde (en dacron, tissu synthétique utilisé pour les prothèses vasculaires) vise à éviter les réactions d'inflammation.

Quelles applications sont envisagées ?

Ph. C. : La biopile pourrait alimenter tous les dispositifs médicaux implantables : stimulateurs cardiaques ou cérébraux (utilisés par exemple dans le traitement de la maladie de Parkinson), pompes à insuline pour les diabétiques, etc. Le nombre de patients potentiels est considérable.

Aujourd'hui, on doit remplacer les batteries de ces dispositifs tous les sept ou huit ans. Notre biopile pourrait en théorie fonctionner toute la vie du patient, car le glucose et l'oxygène sont constamment renouvelés dans l'organisme. Cela éviterait des opérations chirurgicales, en particulier avec les dispositifs multiples aujourd'hui à l'étude : les nouveaux stimulateurs cardiaques

de l'entreprise *Sorin*, partenaire du projet, pourraient être implantées en plusieurs endroits du cœur pour traiter certaines insuffisances cardiaques. L'intérêt sera aussi accru pour divers dispositifs en développement, plus gourmands en énergie (et qui épuiseront vite les piles classiques), tels le sphincter urinaire artificiel et robotisé de la jeune pousse *Uromems* ou des reins artificiels implantables...

Cette biopile sera-t-elle bientôt disponible ?

Ph. C. : Les essais chez l'homme pourraient débuter d'ici trois à cinq ans. Nous avons déjà implan-



Ph. Cinquin dirige le laboratoire TIMC-IMAG (UJF/CNRS).

té la biopile chez des rats et des lapins. Des essais sont prévus sur des brebis et des vaches, où elle alimentera divers instruments de mesures physiologiques conçus par l'entreprise *Biopic*. Le premier marché sera d'ailleurs sans doute celui de la santé animale. Les tests sur des animaux permettront de valider la fiabilité et l'innocuité de l'appareil, avant de passer à l'homme. Parallèlement, l'amélioration de la biopile se poursuit, en collaboration avec des laboratoires tels que le LGP2 et le CEA-LETI, afin notamment d'augmenter sa puissance ou de diminuer sa taille.

G. J.

www.ibfc.fr

Éthologie

Des oiseaux déboussolés

Les oiseaux migrateurs s'orientent notamment grâce au champ magnétique terrestre. Svenja Engels, de l'Université d'Oldenburg, en Allemagne, et ses collègues ont montré qu'en zone urbaine, les émissions électromagnétiques d'origine humaine désorientent au moins certains d'entre eux (les rouges-gorges *Erithacus rubecula*).

Au moyen d'observations réalisées en laboratoire, les éthologistes ont constaté qu'au printemps et à l'automne, les oiseaux décollaient dans une direction aléatoire et non vers leur lieu de migration. Quand le bruit électromagnétique était bloqué par des écrans en aluminium, les rouges-gorges s'orientaient correctement. Quand un bruit électromagnétique artificiel imitait les émissions anthropiques, ils étaient à nouveau désorientés. Les fréquences composant ce bruit suggèrent que les émissions perturbatrices sont celles des radios AM et des appareils électroniques usuels.

G. J.

S. Engels et al., *Nature*, en ligne le 7 mai 2014

Astrophysique

Étoiles dévoreuses de Terres

On est ce que l'on mange. Cette maxime s'applique aussi aux étoiles ! Avec ses collègues, Claude Mack, de l'Université Vanderbilt aux États-Unis, a découvert des indices que certaines étoiles ont avalé des planètes rocheuses de type terrestre.

L'analyse du spectre lumineux de l'étoile permet de retracer sa composition chimique élément par élément. L'abondance de certains éléments, tels l'aluminium ou le fer, indiquerait la quantité de matière rocheuse tombée sur l'étoile. Cette matière proviendrait de planètes poussées trop près de l'étoile par des planètes géantes gazeuses ayant migré depuis la périphérie du système.

Les astrophysiciens ont appliqué la méthode à un système binaire où des planètes géantes gravitent autour des deux étoiles HD 20781 et HD 20782. Ces dernières semblent avoir englouti respectivement l'équivalent de 10 et 20 Terres. Il y aurait alors peu de chance que le système abrite encore des planètes rocheuses.

G. J.

C. E. Mack III et al., *The Astrophysical Journal*, en ligne le 7 mai 2014

Énergie

Des éoliennes à rebours

Pour améliorer le rendement d'un parc éolien, des chercheurs préconisent de faire tourner les éoliennes qui se succèdent dans des directions contraires.

Dans les parcs éoliens, les turbines directement exposées au vent extraient plus d'énergie que les autres. En effet, une éolienne perturbe l'écoulement de l'air dans son sillage, où se crée une zone de turbulences et de ralentissement qui pénalise le rendement global (jusqu'à 30 pour cent pour des parcs d'éoliennes en mer). À l'échelle d'un pays, l'impact est donc considérable.

Une solution originale pour tenter de limiter ce phénomène est d'utiliser un système d'éoliennes contrarotatives. Le sillage d'une turbine formant un tourbillon de sens opposé à la rotation des pales, l'idée est de récupérer davantage

d'énergie en imposant à l'éolienne située en aval le même sens de rotation que ce tourbillon.

Wei Yan et ses collègues, de l'Université de l'État de l'Iowa, ont évalué l'efficacité d'un tel système en soufflerie. Résultat : lorsque l'écart entre deux éoliennes est faible – de l'ordre d'un diamètre de rotor – l'éolienne placée à l'arrière extrait 20 pour cent d'énergie en plus si elle tourne dans le sens opposé.

Le gain ainsi réalisé décroît rapidement avec l'écart entre éoliennes. Inapplicable aux parcs éoliens en mer, très étalés, une telle solution pourrait se révéler productive pour les parcs éoliens installés sur la terre ferme, où l'espacement entre les turbines est plus réduit.

Y. P.

Science China Phys., Mech. & Astron., vol. 57(5), pp. 935-949, 2014



Une éolienne diminue le rendement de celle placée dans son sillage. Les faire tourner en sens inverses améliorerait la situation.

Des vagues titanesques

Titan, une lune de Saturne, abrite des nuages, de la pluie, des lacs d'hydrocarbures... et désormais des vagues. L'équipe de Jason Barnes, de l'Université de l'Idaho, a en effet observé dans les images de la sonde *Cassini* une réflexion anormale de la lumière solaire en provenance d'une région nommée Punga Mare, qui s'expliquerait par la présence de vagues hautes de... deux centimètres. Ces vagues confirmeraient que les « lacs » de Titan ont bien une certaine profondeur et ne sont pas juste des sols humides.

Le silence des criquets

Les criquets *Teleogryllus oceanicus* des îles de Hawaï sont victimes d'un parasite, la mouche *Ormia ochracea*, qui est attirée par leur bruit. En 2001, une mutation de la forme des ailes est apparue et a rendu silencieux certains criquets de l'île Kauai. En deux ans, la mutation s'est imposée. Nathan Bailey, de l'Université Saint Andrews au Royaume-Uni, et son équipe ont montré que les criquets de l'île Oahu sont devenus à leur tour silencieux, mais à cause d'une mutation différente – un exemple de convergence évolutive !

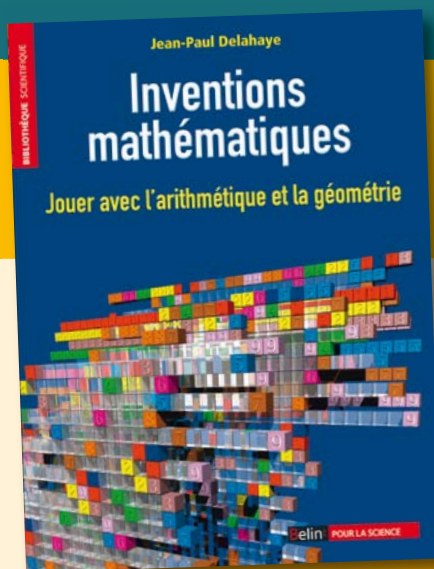
Des ouragans féminins plus meurtriers

Pour désigner les ouragans, les météorologistes leur attribuent un prénom, alternativement masculin et féminin. Kiju Jung, de l'Université de l'Illinois, et ses collègues ont remarqué que ceux qui portent un prénom féminin causent plus de décès. Selon les chercheurs, la population serait moins effrayée par ces prénoms et prendrait moins de précautions...

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

L'univers mathématique

de Jean-Paul Delahaye



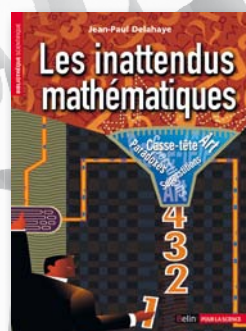
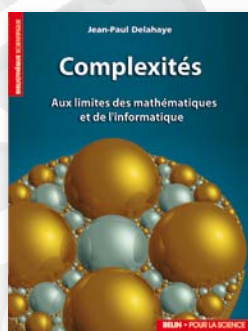
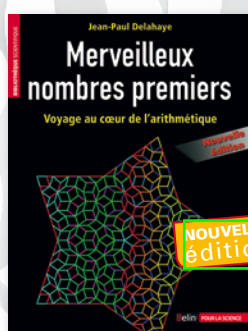
NOUVEAU !

Inventions mathématiques

Jouer avec l'arithmétique et la géométrie

Les mathématiques sont vivantes et l'imagination des chercheurs et des amateurs n'est jamais en repos. Sans cesse, de nouvelles idées conduisent à des inventions qui réjouissent, étonnent et instruisent. Dans ce livre, vous trouverez des figures paradoxales, des jeux classiques comme le Tangram et le cube de Rubik, des problèmes du quotidien tels le découpage d'une pizza ou l'accrochage d'un tableau, des énigmes élémentaires ou complexes, ou encore des images grises où la cryptographie cache des visages et des animaux. Vous serez étonné... à chaque page !

À l'occasion de la parution de son nouveau livre **Inventions Mathématiques**, redécouvrez l'ensemble de ses ouvrages parus dans la collection Bibliothèque scientifique.



Retrouvez Jean-Paul Delahaye chaque mois dans la rubrique "Logique et calcul" de *Pour la Science* !

Jean-Paul Delahaye est professeur d'informatique à l'Université des sciences et technologies de Lille et chercheur au Laboratoire d'informatique fondamentale du CNRS, à Lille.

POINT DE VUE

Pour une économie morale des gènes

Aux États-Unis, un jugement récent a décidé que les gènes non modifiés par l'homme ne sont pas brevetables. Pour des raisons qui tiennent tant à l'économie qu'à l'éthique, l'Europe devrait elle aussi revenir sur sa position autorisant la brevetabilité des gènes.

Maurice Cassier

En juin 2013, huit des neuf juges de la Cour suprême des États-Unis décidaient que les gènes isolés de leur environnement naturel ne sont pas brevetables. Ce faisant, la Cour remettait en question 30 années de pratique de l'Office américain des brevets, issus de la recherche privée ou de la recherche publique, au point qu'on estime qu'aujourd'hui 5 000 gènes humains (soit 1/5 du total) ont été soumis à des brevets. Ce jugement suivait la position du Gouvernement des États-Unis, publiée en octobre 2010 et pour qui les gènes isolés par des biologistes, et n'ayant subi aucune modification, ne sont pas brevetables, tandis que les gènes modifiés en laboratoire, les séquences d'ADN complémentaire construites par les chercheurs, peuvent l'être. Il s'agissait bien d'une révision fondamentale de la politique des brevets des gènes suivie jusqu'alors aux États-Unis.

D'où vient un tel revirement ? Qu'en est-il de la situation européenne ? Il apparaît une singulière asymétrie, entre les États-Unis, où les gènes naturels sont dans le domaine public, et la France et l'Europe, où ils demeurent appropriables par brevet. De surcroît, la question de la brevetabilité des gènes, qui a agité la communauté médicale européenne il y a quelques années, inquiète aujourd'hui celle des semenciers et des agriculteurs.

La décision américaine de 2013 clôturait un procès de plusieurs plaignants contre les Laboratoires *Myriad* qui commercialisaient

un test de dépistage des gènes BRCA1 et BRCA2 de prédisposition au cancer du sein. Ces gènes ont été séquencés en 1994, et plusieurs brevets pour des tests de dépistage ont été déposés par divers laboratoires privés, tel *Myriad*, mais aussi publics. Ainsi, entre 1994 et 1998, des tests ont été proposés aux Américaines, avant même l'obtention des brevets. Mais, en 1998, ce sont les Laboratoires *Myriad* qui ont décroché le brevet, face à tous leurs concurrents, s'imposant sur le marché nord-américain du dépistage de la prédisposition au cancer du sein.

LE PARLEMENT ET LE CONSEIL EUROPÉENS devraient placer les entités biologiques et les gènes simplement isolés de leur environnement dans le domaine commun de la science et de l'innovation.

Lors du procès de 2013, les grandes associations de patients et de médecins ont fait valoir que les brevets de gènes, compte tenu de l'étendue du monopole qu'ils autorisaient, étaient susceptibles de contrarier l'éthique médicale : des généticiens pourraient être sommés par ceux qui détenaient les brevets de cesser de proposer leurs tests sous peine d'être poursuivis pour contrefaçon. Les associations de patientes ont soutenu que de tels brevets, qui empêchent une libre concurrence, renchérissent les tests génétiques, lesquels deviennent inabordables pour les femmes aux revenus modestes.

La récente décision de la Cour suprême a changé la donne, puisque tous les gènes isolés en laboratoire sont tombés dans le

domaine public, si bien que tout laboratoire clinique ou entreprise peut les utiliser librement pour développer des tests génétiques ou des technologies médicales.

L'invalidation des brevets de gènes par la Cour suprême reposerait sur des justifications qui tiennent à l'économie de l'innovation et à une morale de la non-appropriation des « produits de la nature », inscrite dans la jurisprudence des brevets depuis plus d'un siècle aux États-Unis. Il existerait deux types de gènes : les gènes « simplement isolés » de la nature, qui ne doivent pas être brevetés,

et les gènes « construits en laboratoire » qui pourraient l'être. Ainsi, le jugement de la Cour suprême a restauré une conception du droit des brevets qui sépare les produits de la nature, considérés

comme un bien commun, et les produits créés par l'homme, sur lesquels on peut instaurer un monopole temporaire. C'était notamment la position de John Locke, philosophe anglais du XVII^e siècle, pour qui l'homme s'approprie les biens de la nature dès lors qu'il y mêle son travail.

En outre, par leur décision, les juges de la Cour suprême entendaient stimuler l'innovation des sociétés de biotechnologie qui testent simultanément un grand nombre de gènes et seraient entravées par la fragmentation de la propriété.

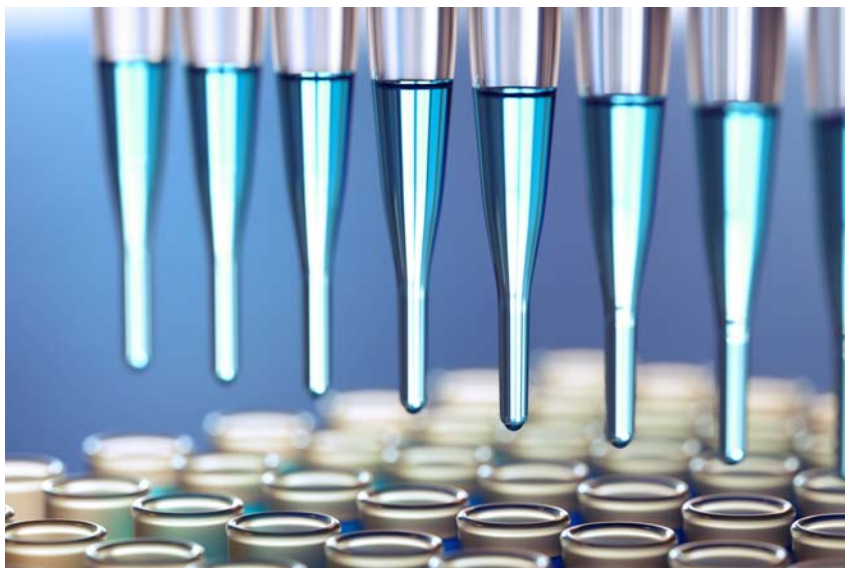
Quelle était la situation en Europe au moment où les Laboratoires *Myriad* obtenaient leur brevet ? Les aspects éthiques et économiques y étaient également au cœur

des débats sur la brevetabilité des gènes. Une directive européenne sur la protection juridique des biotechnologies datant de juillet 1998 visait à rendre les gènes brevetables pour favoriser le développement de l'industrie biotechnologique en Europe et éviter que les généticiens ne partent s'installer aux États-Unis. Un autre facteur jouait en faveur d'un droit à la brevetabilité des gènes : on pensait alors qu'on pourrait guérir les personnes atteintes d'une maladie génétique en leur injectant le « gène médicament », compensant le gène anormal.

C'est dans l'espoir de hâter l'avènement des thérapies géniques que beaucoup étaient, en Europe, à la fin des années 1990, favorables à la brevetabilité des gènes. L'industrie pharmaceutique demanda même le soutien des associations de patients pour faire admettre les brevets de gènes au nom du « droit à la vie ». Malheureusement, dans les années qui ont suivi, on a découvert les difficultés que pose la thérapie génique.

À la même époque, le Parlement européen faisait valoir les principes de non-appropriation des éléments du corps humain et l'éthique du partage des connaissances. Le Parlement européen refusa d'abord la brevetabilité des gènes en 1995, mais finit par l'accepter en 1998. La controverse réapparut au début des années 2000, après l'obtention par *Myriad* de son brevet. Voulant préserver l'accessibilité des tests génétiques en Europe au nom de l'intérêt public et de l'éthique médicale, un consortium de généticiens et de médecins européens s'opposa à ces brevets devant l'Office européen des brevets. Plusieurs ministères de la Santé et des associations de malades les rejoignirent dans ce que la revue *Science* appela la « rébellion » des généticiens européens pour faire valoir le « droit à la santé » des patientes.

Aujourd'hui, en Europe, non seulement la question n'est pas tranchée en génétique humaine, mais le débat s'étend à la biologie végétale, où semenciers et agriculteurs européens s'opposent aux brevets qui voudraient les empêcher de disposer librement des gènes naturels de plantes obtenues par croisement classique, sans modification génétique. Les agriculteurs sont inquiets, craignant d'être poursuivis en contrefaçon



LES DISPOSITIFS DES BIOTECHNOLOGIES permettent de tester des échantillons et des gènes en grand nombre. Les brevets sur les gènes compliquent les recherches et augmentent les coûts.

pour l'usage des semences issues de récoltes qui sont pourtant le fruit de leur travail.

Dans le domaine médical, les laboratoires publics, tel l'Institut national du cancer, entendent diffuser les nouvelles générations de diagnostic génétique. Testant simultanément un grand nombre de gènes, voire le génome entier, ils auraient tout à gagner à la non-brevetabilité des gènes, qui éliminerait tout risque de contrefaçon et les coûts supplémentaires liés aux redevances sur les brevets.

Selon moi, le Parlement et le Conseil européens devraient se saisir à nouveau de la question pour aller dans le sens de la décision de la Cour suprême des États-Unis en plaçant les entités biologiques et les gènes simplement isolés de leur environnement dans le domaine commun de la science et de l'innovation. Une telle mesure favoriserait l'invention et un meilleur usage des technologies médicales disponibles aujourd'hui. Le libre usage des génomes des virus pathogènes favoriserait le développement de nouveaux vaccins à des prix plus accessibles aux populations les plus pauvres, et garantirait la viabilité de nos assurances santé. Une telle décision permettrait en outre de s'émanciper d'une morale de l'accaparement de la nature au profit d'une morale de la coopération avec la nature. Ce faisant, on

ne pourrait pas revendiquer de droit exclusif sur des entités que l'on n'a pas créées ou transformées de façon substantielle.

Cette décision serait applicable aux végétaux, et renouerait avec l'esprit des législateurs qui, dans les années 1960, inventèrent un système d'appropriation relativement équilibré pour les variétés végétales, afin de tenir compte de la contribution de la nature aux inventions. Ainsi, un semencier peut recevoir un certificat d'obtention végétale pour une mise en forme spécifique du patrimoine génétique d'une plante, nouvelle et originale, mais l'ensemble des gènes de la plante reste dans le domaine public. Ce système s'étendrait aux animaux ou aux micro-organismes. Quant aux humains, la non-brevetabilité des gènes respecterait le principe de non-appropriation du corps humain et de ses éléments, les utilisations d'embryons humains à des fins industrielles ou commerciales étant déjà exclues de la brevetabilité par le droit européen. ■

Maurice CASSIER est directeur de recherche au CNRS, Centre médecine, sciences, santé, santé mentale et société, à Villejuif.



Réagissez au Point de vue sur www.pourlascience.fr

QUESTIONS OUVERTES

Qu'est-ce que la chimie verte ?

Le concept est apparu dans les années 1990 pour promouvoir une chimie plus soucieuse de l'environnement et de la santé. Il nécessite de prévoir les propriétés potentiellement toxiques des nouvelles molécules, ce que l'on ne sait pas encore bien faire.

Laura MAXIM

Chimie verte, chimie durable, chimie biosourcée, propre, environnementale... Depuis quelques années, tant dans les médias que dans les appels à projets de recherche, la chimie se retrouve associée à de multiples qualificatifs très en vogue par ailleurs dans les discours politiques. Qu'entend-on par chimie verte ? Comment ce concept est-il apparu et quels en sont les enjeux ? La chimie verte est-elle vraiment verte ? C'est ce que nous allons examiner ici.

La chimie verte est née d'une prise de conscience : les chimistes peuvent influencer sur la pollution que produisent les substances synthétisées. Dans la chaîne qui relie le chercheur, l'industriel, le consommateur et le politique, la recherche en laboratoire – susceptible d'aboutir à des innovations et à des produits commercialisés – doit se préoccuper très en amont des effets sanitaires et environnementaux de la chimie. Comment ? En multipliant les collaborations avec d'autres disciplines en prise directe avec ces questions, telles que les sciences de l'environnement et la toxicologie.

Les premières références au terme « chimie verte » sont américaines et remontent aux années 1990. Cette époque est caractérisée par un changement dans les politiques environnementales aux États-Unis. L'industrie est appelée à remplacer le traitement des déchets en aval par la prévention de la pollution à la source : dans un contexte de controverses, vives et nombreuses, autour des effets toxiques

des déchets et, plus généralement, de la chimie, une loi, le *Pollution Prevention Act*, impose la démarche de prévention de la pollution au niveau fédéral. Le mauvais contexte économique de l'époque a joué un rôle important dans l'adoption de cette loi en 1990, sous la présidence de George Bush : les coûts du contrôle de la pollution étaient tels que les industriels y ont vite vu leur intérêt.

En 1991, en réponse à cette loi, l'Agence américaine pour la protection de l'environne-

LA CHIMIE VERTE SERAIT AINSI le serment d'Hippocrate du chimiste : avant tout, ne pas nuire.

ment (EPA) lance un programme de « chimie verte », notion qu'elle définit ainsi : « La chimie verte a pour but de concevoir des produits et des procédés chimiques permettant de réduire ou d'éliminer l'utilisation et la synthèse de substances dangereuses. » Le danger est ici pris au sens large : physique (substance inflammable, explosive...), toxicologique (cancérogène, mutagène...) ou global (destruction de la couche d'ozone, pollution environnementale...).

À ses débuts, le concept de chimie verte est interchangeable avec ceux de chimie environnementale, chimie propre et chimie bénigne par conception. La chimie environnementale était déjà un domaine installé dans le paysage scientifique des années 1980, mais elle se focalisait sur l'étude de la pollution, pour mesurer et contrôler les émissions.

L'un des premiers chimistes à avoir promu le terme de chimie verte, sans le définir avec précision, est un ancien directeur de la division chimie de la Fondation américaine pour la science (NSF), Kenneth Hancock. Il a donné son nom à un prix américain décerné aux étudiants qui se distinguent par leurs travaux en chimie verte. En 1993, il expliquait dans la revue *Science* : « Dès que vous parlez de marées noires, de déchets, de trou dans la couche d'ozone... ou de tout autre problème environnemental inconnu auparavant... c'est la chimie qui est tenue pour responsable. » Mais, poursuivait-il, les chimistes peuvent remédier aux problèmes qu'ils ont contribué à créer : « Toute solution que vous imaginerez viendra de la chimie. »

Il concrétise ces déclarations en lançant des programmes de financement des recherches en chimie verte à la NSF, le premier en 1992, de l'ordre de 950 000 dollars, suivi en 1993 d'un cofinancement en partenariat avec l'EPA. Il s'agit d'encourager des projets de synthèse chimique qui accordent une attention particulière à l'impact sur la santé et sur l'environnement.

C'est d'ailleurs un chimiste de l'EPA qui est le père reconnu de la chimie verte. Paul Anastas – coauteur d'un des premiers livres sur le sujet en 1994 – a d'abord proposé le terme de « chimie bénigne par conception ». Dès cet ouvrage, le ton est donné. Pour P. Anastas, la prévention de la pollution n'est plus une préoccupation d'une communauté minoritaire en chimie – celle de la chimie analytique et atmosphérique –, mais une

question qui concerne une des branches les plus nobles et les plus représentatives de la discipline, celle qui s'intéresse à la synthèse. Jusqu'alors, la réflexion des chimistes de synthèse était guidée par deux critères : les fonctions que les substances synthétisées vont accomplir et le coût de production industrielle de ces substances. Avec la chimie verte, un troisième critère s'ajoute : les effets sur la santé et sur l'environnement. Ces effets peuvent être pris en compte dès la phase de conception des molécules et redéfinissent l'idée même d'« élégance » d'une réaction, chère aux chimistes. La chimie verte serait ainsi le serment d'Hippocrate du chimiste : avant tout, ne pas nuire.

Dès 1996, le terme chimie verte s'impose par rapport aux autres terminologies, notamment le terme « bénin par conception », qui s'était révélé trop restrictif. Le concept est renforcé par la création aux États-Unis, en 1995, du Prix présidentiel pour les défis en chimie verte. À partir de 1997, des conférences annuelles sur la chimie verte ont lieu, la Société américaine de chimie diffuse des matériaux pédagogiques pour l'université et le lycée, des masters et des thèses de doctorat sont soutenus.

Un début chaotique en Europe

La diffusion du terme est renforcée par le succès du livre *Green chemistry: theory and practice*, publié en 1998 par P. Anastas et John Warner. S'il a tant de succès, c'est parce qu'il définit la chimie verte en 12 principes pragmatiques, devenus depuis la marque de ce domaine (voir l'encadré page 16). Plusieurs de ces principes (amélioration du rendement, chimie catalytique) constituent déjà des champs de recherche en chimie, mais il s'agit désormais de les rassembler avec un même objectif : construire une chimie soucieuse de la santé et de l'environnement.

En Europe, ce concept s'est développé de façon plus chaotique. Dès 1999, les industriels allemands de la chimie ont réagi défavorablement au terme « chimie verte » qui, pour eux, laissait présager des changements en accord avec les positions du Parti des Verts. Le terme a fini par s'imposer et, en

même temps, le terme « chimie durable » a été de plus en plus utilisé comme équivalent.

Le concept de chimie verte n'a vraiment émergé en France que récemment, dans les années 2007-2008, dix ans après son essor aux États-Unis. Cette émergence coïncide avec le premier programme de financement de l'Agence nationale de la recherche intitulé *Chimie et procédés pour le développement durable*, et avec les débuts du programme interdisciplinaire du CNRS, *Chimie pour le développement durable*.

En France, une chimie avant tout « biosourcée »

Dans la lignée d'un ouvrage intitulé *La chimie verte* dirigé par Paul Colonna, chercheur à l'Institut national de la recherche agronomique, en 2005, la chimie verte a d'abord été vue comme une chimie biosourcée – une chimie qui s'appuie sur des matières premières dérivées de ressources végétales plutôt que du pétrole. Les recherches françaises sur les biocarburants et la chimie végétale étaient déjà engagées depuis de nombreuses années, et le terme « chimie verte » a permis de leur donner un nouveau souffle. Des produits aujourd'hui issus majoritairement du pétrole, tels que des peintures, encres, adhésifs, enrobages de médicaments, couches, emballages, sacs poubelle, couverts pour la restauration rapide et autres plastiques, peuvent à présent être produits à partir de végétaux tels que des oléagineux ou des algues. Certains de ces produits sont même biodégradables et produisent moins de déchets.

Puis, avec l'augmentation du nombre de chercheurs français intéressés par ce domaine, les frontières sémantiques ont évolué, et la chimie biosourcée est redevenue une catégorie de la chimie verte, nommée « chimie du carbone renouvelable », ou « chimie du végétal ». La définition de la chimie verte s'est élargie, incluant par exemple les méthodes qui permettent de réduire la consommation d'énergie ou la catalyse pour limiter les quantités de réactifs utilisés. La chimie verte comporte aussi de nouveaux schémas de synthèse imaginés pour remplacer des réactifs dangereux ; il



s'agit, par exemple, d'utiliser des systèmes biologiques (bactéries, levures...) pour fabriquer et transformer des molécules grâce à des procédés enzymatiques ou de fermentation. L'utilisation de matériaux recyclables et la valorisation des déchets participent aussi de la chimie verte. Néanmoins, la confusion subsiste parfois et les usages du terme restent multiples en France. Si désormais la chimie verte ne rime plus seulement avec une chimie qui vise une gestion à long terme des ressources, et devient plus soucieuse des impacts toxiques sur la santé et l'environnement, certains lui préfèrent le terme de chimie durable, qui n'est pas défini précisément.

Et la toxicité, qui était pourtant la préoccupation originale de la chimie verte ?

Dès les débuts de la chimie verte, des chimistes ont proposé de déterminer, avec l'aide de toxicologues, les caractéristiques moléculaires responsables de la dangerosité des substances chimiques et ainsi de les éviter en concevant de nouvelles molécules qui en seraient dépourvues. Plusieurs méthodes étaient possibles : analyser les mécanismes d'action et utiliser les relations entre la structure et l'activité, éviter certains groupes fonctionnels ou minimiser la biodisponibilité des molécules, c'est-à-dire les modifier de telle sorte qu'elles n'arrivent pas aux organes qu'elles pourraient endommager.

Qu'en est-il aujourd'hui, 20 ans après les débuts de la chimie verte ? Aux États-Unis comme en France, les propriétés toxiques des

substances sont étudiées à diverses étapes des procédés : on privilégie des solvants moins ou pas dangereux (par exemple, l'eau ou le dioxyde de carbone supercritique remplacent, quand c'est possible, des solvants organiques), on réduit autant que possible les quantités de produits néfastes et on tient compte de la biodégradabilité des matériaux. Toutefois, si des avancées ont bien été enregistrées dans la conception des procédés, la relation entre chimie et toxicologie reste le maillon faible de la chimie verte lorsqu'il s'agit de prévoir que telle nouvelle molécule aura ou non des propriétés toxiques.

Une étude toxicologique encore timide

Certes, quelques illustrations de cette préoccupation toxicologique peuvent être évoquées. À l'Université Carnegie Mellon, aux États-Unis, des chimistes de l'équipe de Terry Collins collaborent avec des spécialistes des perturbations endocriniennes (hormonales) ; leur travail commun a permis de proposer des tests pour anticiper des propriétés indésirables dans la synthèse de nouvelles substances. L'Université de Californie à Berkeley développe aussi des recherches dans ce sens dans son Centre pour la chimie verte, via une équipe interdisciplinaire. À l'Université Yale, P. Anastas coordonne un projet récemment financé par la NSF et l'EPA, visant à développer des démarches toxicologiques prédictives applicables à la chimie de synthèse. En chimie, la modélisation joue déjà un rôle important pour concevoir et optimiser les procédés de synthèse. Il s'agit d'intégrer une composante environnementale aux modèles existants et d'en déduire une estimation de la toxicité des produits de synthèse.

En France, on peut citer la synthèse, par une équipe mixte du CNRS et de l'Université de Rennes, de mousses plastiques, les polyuréthanes biodégradables, sans utiliser d'isocyanates – des substances toxiques. Un autre exemple est l'élaboration, par la Chaire européenne de chimie nouvelle pour un développement durable ChemSuD et une équipe de l'Institut Charles Gerhardt de Montpellier, de résines époxy biosourcées

Les 12 principes de la chimie verte

- 1 Prévention :** il vaut mieux éviter la production de déchets qu'investir dans leur élimination.
- 2 Économie d'atomes et de réactifs :** les synthèses doivent optimiser l'incorporation, dans le produit final, des matériaux utilisés au cours du procédé.
- 3 Synthèse moins nocive :** les méthodes de synthèse doivent utiliser et créer des substances faiblement ou non toxiques pour les humains et pour l'environnement.
- 4 Produits moins toxiques :** pour une fonction donnée, les produits chimiques doivent être conçus de façon à minimiser leur toxicité.
- 5 Solvants moins dangereux :** lorsque c'est possible, éviter l'utilisation de substances auxiliaires (solvants, agents de séparation...) ou utiliser des substances inoffensives.
- 6 Économie d'énergie :** les besoins énergétiques des procédés chimiques ont des impacts sur l'économie et l'environnement et doivent donc être minimisés. Les méthodes de synthèse devraient avoir lieu à température et pression ambiantes.
- 7 Ressources renouvelables :** lorsque c'est faisable d'un point de vue technique et économique, les matières premières utilisées doivent être renouvelables.
- 8 Moins d'agents auxiliaires :** lorsque c'est possible, tout écart inutile au schéma de synthèse (utilisation d'agents bloquants, protection/déprotection, modification temporaire du procédé physique/chimique) doit être évité.
- 9 Catalyse :** les réactifs catalytiques (les plus sélectifs possibles) sont plus efficaces que les réactifs stoechiométriques.
- 10 Dégradation :** les produits chimiques doivent être conçus pour se dissocier en produits de dégradation non nocifs à la fin de leur durée d'utilisation, évitant ainsi leur persistance dans l'environnement.
- 11 Contrôle en temps réel :** des méthodologies analytiques doivent être développées afin de permettre une surveillance et un contrôle en temps réel des procédés, avant qu'il y ait apparition de substances dangereuses.
- 12 Limiter les accidents :** les substances utilisées dans un procédé chimique et leur forme devraient être choisies de façon à minimiser les risques d'accidents chimiques, incluant les rejets, les explosions et les incendies.

Un exemple : des résines époxy à base de vanilline

Les résines époxy, une classe importante de polymères thermodurcissables, sont utilisées en tant que revêtements, peintures, vernis, adhésifs, dans de nombreux secteurs tels que l'électronique, les matériaux ou l'aérospatial.

En raison de leurs propriétés mécaniques et électriques, de résistance chimique, d'adhérence et de leur retrait minimal après durcissement, elles interviennent dans nombre de structures. La plupart de ces polymères sont fabriqués à partir de bisphénol A, un composé qui contient des cycles aromatiques, particulièrement adaptés, car ils confèrent leur résistance thermique et chimique aux résines époxy. Mais le bisphénol A est un perturbateur endocrinien, dont l'impact négatif sur la santé humaine et l'environnement a conduit à son interdiction dans

de nombreux matériaux en France et en Europe. C'est pourquoi des composés de substitution moins dangereux sont nécessaires.

Ainsi, l'industrie chimique montre un intérêt croissant pour des composés aromatiques non nocifs permettant la synthèse de résines époxy thermodurcissables sans bisphénol A. Par ailleurs, avec la limitation et le coût élevé des ressources fossiles, des ressources renouvelables constitueraient un avantage. Mais si de nombreux réactifs issus de ressources renouvelables sont disponibles pour élaborer des matériaux,

notamment à partir de dérivés d'huiles végétales et d'amidon, la plupart ne contiennent pas de cycles aromatiques (les composés aromatiques de la biomasse sont peu disponibles pour la chimie).

Notre équipe s'intéresse à la substitution de composés dangereux et d'origine fossile par des composés moins dangereux et d'origine renouvelable (l'un n'impliquant pas forcément l'autre). Nous étudions notamment la substitution du bisphénol A dans les résines époxy par des composés aromatiques d'origine renouvelable, produits à partir de tanins de différentes espèces d'arbres. Les tanins sont des phénols naturels contenant des cycles aromatiques, présents dans les écorces des arbres. Cependant, ils sont peu abondants et souvent trop réactifs (ils s'oxydent facilement).

Parmi ceux que nous

étudions, l'huile de noix de cajou contient trop peu de cycles aromatiques et sa production est limitée. La lignine, le polymère naturel de structure des végétaux le plus abondant, contient une grande concentration de composés aromatiques, mais on ne sait pas encore la dépolymériser. La vanilline est plus prometteuse. Issue de la lignine et produite à l'échelle industrielle, elle permet d'obtenir un composé non dangereux selon les critères de la réglementation européenne. Récemment, nous avons proposé un procédé pour fabriquer des composés de vanilline époxydés qui pourraient remplacer le bisphénol A dans les résines époxy.

- Sylvain Caillol
Directeur adjoint de l'Institut
Carnot Chimie Balard,
à Montpellier

et sans bisphénol A – un perturbateur endocrinien en passe d'être interdit en France (voir l'encadré ci-dessus).

Si ces exemples sont encourageants, ces préoccupations restent encore marginales. Aux États-Unis comme en France, les communautés des chimistes de synthèse et des toxicologues n'ont pas l'habitude de travailler ensemble. De plus, les outils de toxicologie prédictive prêts à l'emploi pour les chimistes sont aujourd'hui hors de portée. Un des enjeux est de savoir s'ils le seront un jour et dans quel délai. La toxicologie et l'écotoxicologie ne sont toujours pas enseignées aux chimistes, à l'exception de rares cas de formations de l'enseignement supérieur qui fournissent aux chimistes des connaissances sur les impacts sanitaires et environnementaux de la chimie (par exemple, à l'École nationale supérieure de chimie de Paris ou à l'Université de Californie à Berkeley).

En France, deux autres raisons s'ajoutent. D'abord, l'État a sous-investi dans la recherche en toxicologie et, plus largement, sur les questions de santé environnementale. Parce que la toxicologie a toujours été associée au contrôle réglementaire des risques chimiques, elle a pu être considérée comme une discipline contre-économique et « moins noble » selon les critères de la science.

De même, le règlement européen REACH (Enregistrement, évaluation, autorisation et restrictions des substances chimiques) n'a qu'une faible résonance sur la recherche académique. L'objectif de ce règlement n'est pas d'interdire des substances dangereuses, mais de les identifier pour mieux permettre leur remplacement par des alternatives plus sûres. On aurait donc pu s'attendre à une explosion des recherches visant à développer des substituts aux molécules dangereuses aujourd'hui en usage. Pour-

tant, ce n'est pas le cas, et la lenteur dans l'application du règlement y est probablement pour quelque chose.

Ce court historique de la chimie verte montre que les avancées dans ce domaine dépendront de l'orientation donnée aux financements publics de la recherche et de l'efficacité des politiques environnementales qui, comme REACH, visent à caractériser les risques chimiques. Si la volonté et la motivation de la communauté des chimistes sont claires, le futur de la chimie verte dépendra beaucoup des politiques publiques. ■

Laura MAXIM est chargée de recherche au CNRS, à l'Institut des sciences de la communication, à Paris.

L. Maxim (dir.), *La chimie durable, au-delà des promesses*, CNRS Éditions, 2011.

P. T. Anastas, J. C. Warner, *Green Chemistry: Theory and Practice*, Oxf. Univ. Press, 1998.

HOMO SAPIENS INFORMATICUS chronique de Gilles Dowek



Les avatars du Docteur Diafoirus

La création récente d'écoles d'informatique résulte de l'inadéquation du système de formation des ingénieurs.

L'année académique qui s'achève a vu la création en France de plusieurs écoles d'informatique, notamment l'école 42 et l'école Simplon, qui s'ajoutent à une liste déjà longue. Le projet pédagogique de ces établissements est parfois loué, parfois vilipendé, mais la question qui nous intéresse ici est celle de la raison pour laquelle ces écoles d'informatique se créent aujourd'hui.

Pour répondre à cette question, il faut sans doute remonter en l'an 1530, date de la fondation par François I^{er} du Collège des Lecteurs royaux – aujourd'hui plus connu sous le nom de Collège de France – et de ses premières chaires consacrées à deux disciplines que l'Université de Paris refusait d'enseigner : le grec et l'hébreu.

Un siècle plus tard, alors que l'Université s'opposait à la science expérimentale et refusait, par exemple, d'enseigner la découverte de la circulation du sang – ce sont ses professeurs qui ont inspiré Molière pour ses portraits de médecins –, Colbert a successivement créé le Jardin royal des plantes médicinales (aujourd'hui Muséum national d'histoire naturelle) en 1665, l'Académie des sciences en 1666 et l'Observatoire de Paris en 1672, pour permettre à la science expérimentale de se développer.

Encore un siècle plus tard, quand l'Université ignorait les besoins en ingénieurs des armées et de l'industrie naissante, on a fondé les premières Grandes écoles : l'École des ingénieurs-constructeurs des vaisseaux royaux en 1741, l'École royale des ponts et

chaussées en 1747, etc. Ce mouvement s'est déroulé sur presque un siècle, puisque l'École centrale des arts et manufactures n'a été créée qu'en 1829, sans que l'Université n'en profite pour réagir.

Plus proche de nous, le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) a été fondé en 1939 pour « tirer un rendement plus élevé de la recherche scientifique », c'est-à-dire pallier les carences, sur le plan de la recherche, des structures existantes.

La création de ces écoles d'informatique n'obéit pas à une autre logique : ces

Il a fallu attendre la rentrée de 2013 pour que les programmes des Classes préparatoires aux Grandes écoles incluent un enseignement obligatoire d'informatique.

établissements ne font que répondre à un besoin auquel ne répondent pas les structures actuelles de formation des ingénieurs, notamment les Grandes écoles et les Classes préparatoires – l'Université étant, sur ce point, en avance de plusieurs décennies. Par exemple, il a fallu attendre la rentrée de 2013 pour que les programmes des Classes préparatoires aux Grandes écoles incluent un enseignement obligatoire d'informatique.

Le ministère de l'Éducation nationale n'a cependant pas jugé utile de recruter des professeurs d'informatique pour dispenser cet enseignement. Voilà un exemple de décision conduisant mécaniquement à l'apparition

d'écoles d'informatique qui, contrairement au Jardin royal des plantes médicinales, se créent désormais à l'extérieur du système public d'enseignement supérieur.

La complexité de notre paysage académique – Universités, Collège de France, Muséum, Académies, Observatoires, Grandes écoles, Classes préparatoires, Instituts de recherche et, désormais, écoles d'informatique, pour ne pas parler de nos agences, alliances et autres initiatives d'« excellence » –, suscite souvent l'admiration de nos collègues étrangers. L'un d'eux me demandait un jour qui avait eu l'intelligence d'inventer tout cela.

La réponse est pourtant simple pour qui a lu *Le malade imaginaire* : ce système inefficace est l'œuvre des *Docteur Diafoirus*, ces partisans du « j'y suis j'y reste », ces maîtres d'éloquence pour qui « les emplois du temps sont déjà très chargés », qui ont refusé l'enseignement du grec et de l'hébreu au XVI^e siècle, se sont opposés à la théorie de la circulation du sang et aux sciences expérimentales au XVII^e siècle, ont ignoré les besoins de l'industrie aux XVIII^e et XIX^e siècles, n'ont pas compris l'importance de la recherche au XX^e siècle, pensent que l'on peut enseigner l'informatique en Classes préparatoires sans professeurs au XXI^e siècle et opposent leur incroyable inertie à tous ceux qui veulent enseigner une science vivante. ■

Gilles DOWEK est chercheur à l'Inria et membre du conseil scientifique de la Société informatique de France.

Offre PASSIONNÉ

POUR LA
SCIENCE



Le magazine mensuel
Pour la Science (12 n^{os})
+
Le thématique trimestriel
Dossier Pour la Science (4 n^{os})

76€ seulement
1 AN - 16n^{os}

VOS AVANTAGES ABONNÉ

- ✓ 26 % d'économie et plus par rapport au prix en kiosque
- ✓ L'envoi des magazines en avant-première
- ✓ La garantie de ne manquer aucun numéro

BULLETIN D'ABONNEMENT

À compléter et à retourner, accompagné de votre règlement, dans une enveloppe non affranchie à : Groupe Pour la Science Service abonnements - Libre réponse 90 382- 75 281 Paris cedex 06

POUR LA
SCIENCE

OUI, je m'abonne à Pour la Science (12 n^{os}/an) + Dossier Pour la Science (4 n^{os}/an) :

☐ 1 an • 16 numéros • **76€** au lieu de 102,70€

26 % de réduction !

Tarif valable uniquement en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 16€ – autres pays 35€.

☐ 2 ans • 32 numéros • **143€** au lieu de 205,40€

+ de 30 % de réduction !

Tarif valable uniquement en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 34€ – autres pays 72€

☐ Je préfère m'abonner seulement au magazine Pour la Science (12 n^{os}/an)

1 an • 12 numéros • 56€ au lieu de 74,90€

Tarif valable uniquement en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 12€ – autres pays 25€



Le mensuel



Le trimestriel

J'indique mes coordonnées :

Nom : _____
Prénom : _____
Adresse : _____

CP : _____ Ville : _____
Pays : _____ Tél. : _____
Pour le suivi client (facultatif)

Je choisis mon mode de règlement :

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Par carte bancaire

Numéro de carte _____

Date d'expiration _____

Clé _____
les 3 chiffres au dos de votre CB

Signature obligatoire

Mon e-mail pour recevoir la newsletter Pour la Science (à remplir en majuscule) : _____

@ _____

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

CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES par Gérald Bronner

Les Simpson savaient-ils ?

Notre cerveau, cherchant un sens au monde qui l'entoure, interprète souvent mal les lois statistiques. Il n'en faut pas plus pour qu'un dessin animé vu par des millions de personnes donne naissance à une théorie conspirationniste.



Le 4 mai 2014, la présentatrice de la chaîne de télévision égyptienne al-Tahrir se fait l'écho d'une rumeur bruissant déjà sur la Toile : le conflit syrien serait l'objet d'une conspiration américaine. Le plus surprenant est la preuve que la présentatrice propose : un passage du célèbre dessin animé *Les Simpson* ! En effet, un épisode datant de 2001 met en scène Bart, le fils de la famille, constituant un groupe de musique avec ses amis. L'un de leurs clips, au ton belliqueux, les montre en train de bombarder des populations arabes. Pour qui connaît un peu l'univers de cette famille américaine, le ton satirique du passage est évident.

L'argument ultime de la présentatrice de al-Tahrir est que sur l'une des jeeps visées, on voit le drapeau de l'opposition syrienne qui n'existait évidemment pas au moment de la diffusion de cet épisode (rappelons que ce drapeau avait été utilisé jusqu'en 1963 et adopté de nouveau en 2011 par l'opposition). Elle conclut en soulignant que « Cela soulève beaucoup de questions à propos du printemps arabe et du moment où cette conspiration globale a commencé. »

Ce n'est pas la première fois qu'un épisode des Simpson est convoqué devant le tribunal de la théorie conspirationniste. Ainsi, un très court passage d'un épisode diffusé en 1997 a été interprété comme annonciateur des attentats du 11 septembre. Au-delà du caractère risible de ces allégations, le « syndrome Simpson » révèle quelque chose d'intéressant sur le fonctionnement de notre esprit.

Mais posons-nous d'abord cette question : pourquoi les Simpson ? Y a-t-il quelque chose de spécifique dans ce divertissement qui

puisse expliquer ce genre de coïncidences ? Non. Et cette série n'est pas la seule à être accusée de trahir l'existence de complots. Ainsi, il a été souligné que la date d'expiration du passeport du héros du film *Matrix* n'est autre que le 11 septembre 2001 !

Quelle était la probabilité pour qu'une telle coïncidence se réalise ? Plutôt faible, pense celui qui croit aux complots... et il a raison. Seulement, son raisonnement est entaché d'une erreur grave. Certes, cette probabilité est faible, mais rapportée à l'échantillon dont



elle est issue, elle n'est guère extraordinaire. Posons la question autrement : quelle est la probabilité pour qu'une date de passeport quelconque présentée dans un des milliers de films tournés chaque année corresponde à une date historique ? On perçoit intuitivement que cette probabilité est supérieure à celle associée à notre première impression.

En effet, notre cerveau prend difficilement conscience de la taille des échantillons associés aux événements dont il évalue la probabilité. Si cette probabilité lui paraît faible, il la trouve suspecte, c'est-à-dire qu'il admet difficilement qu'elle est le fait

du hasard. Dès lors, il cherche un sens, un exercice où il excelle. Par exemple, il peut trouver suspect, aidé en cela par un certain contexte idéologique, qu'une fiction américaine fasse apparaître furtivement un drapeau qui n'existe pas encore. Reconnaissons qu'il faut être particulièrement motivé pour aller chercher de tels éléments dans les milliers d'images d'un dessin animé. Mais ceux qui croient aux complots le sont, et le marché de l'information en expansion a augmenté les dimensions de leur univers paranoïde.

Revenons à la question : pourquoi les Simpson ? La réponse tient non pas aux spécificités narratives de cette fiction, mais à sa longueur. La série, forte de 22 saisons, offre 700 millions d'images à décortiquer ! Dans ces conditions, ce serait extraordinaire si certaines d'entre elles, par le plus pur des hasards, ne présentaient pas des coïncidences, qui ne paraîtraient étonnantes qu'à l'individu ne pouvant ou ne voulant pas les rapporter à la masse de données dont elles sont issues. Si l'on ajoute à cela que la série a connu un succès mondial, on comprend que le nombre de personnes susceptibles de rechercher ce type de coïncidences est gigantesque. Or ces phénomènes de croyance sont directement liés à la masse des informations disponibles. Plus il y a d'informations diffusées, plus la probabilité que l'une d'elles paraisse, *a posteriori*, avoir été la prédiction d'un événement, augmente. C'est simplement là, la source du « syndrome Simpson » ! ■

Gérald BRONNER est professeur de sociologie à l'Université Paris-Diderot.

Peut-on ressusciter des espèces ?

par Vincent Devictor, sur l'Écoblog

Peut-on ressusciter des espèces disparues ? La question se pose, tant l'homme a une responsabilité dans l'érosion de la biodiversité. Tout dépend de la situation. S'il reste ne serait-ce que quelques individus, c'est non seulement possible, mais cela a été réalisé pour quelques espèces emblématiques.

L'oryx d'Arabie est une espèce d'antilope originaire de la péninsule arabique. La population sauvage a été anéantie au cours du XX^e siècle, jusqu'au dernier individu tué en 1972. On considéra alors l'espèce sauvage comme éteinte, les seuls individus restants vivant en captivité dans un zoo américain. Un projet de reproduction de l'espèce en vue de sa réintroduction dans la nature fut alors lancé en 1972. Il a permis de réintroduire l'espèce dans de nombreuses réserves du Moyen-Orient à partir de 1982.

La population sauvage d'oryx d'Arabie compterait aujourd'hui plus de 1 000 individus. Mais le braconnage reprenant et l'habitat naturel étant toujours sous pression, l'avenir de l'espèce dans la nature n'est pas garanti. La population captive (7 000 individus, dont certains aux zoos de Thoiry et de Montpellier) dépasse encore largement la population sauvage. Aujourd'hui, pourtant, cette espèce est seulement considérée comme « vulnérable ».

Mais peut-on réellement ressusciter une espèce quand il n'existe plus aucun individu vivant, même en captivité ? Certains chercheurs plaident en faveur de projets de « désextinction » – recréer des espèces éteintes pour pallier l'impact de l'homme sur la biodiversité.

Le pigeon migrateur est un exemple emblématique d'une telle entreprise. Cette espèce était l'un des oiseaux les plus abondants aux États-Unis. Causant des dommages agricoles, il fut massivement chassé, et le dernier individu s'est éteint en captivité en 1914. Or des spécimens en

bon état sont conservés dans les musées, et on peut récupérer leur ADN. Certains chercheurs proposent d'hybrider cet ADN avec celui de l'espèce la plus proche, le pigeon à queue barrée. L'idée serait de remplacer les allèles les plus significatifs de l'espèce encore vivante par ceux de l'espèce éteinte, pour créer des hybrides.

Des tentatives de reconstruire l'auroch, l'ancêtre des vaches d'aujourd'hui, ont ainsi été proposées dès 1950. Des espèces génétiquement « plus proches » de l'espèce



Martha, le dernier pigeon voyageur (ici empaillé), s'est éteint en captivité en 1914.

Vincent Devictor, Institut national de la recherche scientifique

ancestrale ont été sélectionnées par croisements répétés. Nous n'avons toujours pas réussi à reconstituer un auroch, mais ces croisements ont permis d'aboutir à des individus dont le génotype est proche de ceux de l'espèce ancestrale.

Le clonage du dernier individu du bouquetin d'Espagne, dont le génome a été introduit dans un ovule de chèvre, a donné lieu à un embryon (mort dix minutes après sa naissance). Ce type de manipulation est considéré par certains comme le premier exemple de désextinction.

Pour s'affranchir des problèmes liés à l'hybridation, des projets visant à produire des cellules sexuelles et *in fine* un œuf de l'espèce disparue à partir de cellules somatiques sont à l'étude. L'œuf serait ensuite

porté par une autre espèce : le pigeon voyageur pourrait être pondu par une poule !

Ce genre d'opération se heurte aux obstacles inhérents au clonage animal. Les embryons issus de ces opérations coûteuses sont en général non viables et obtenus après de multiples échecs. Les « succès » fascinent suffisamment pour faire oublier qu'il s'agit d'événements très rares et hasardeux.

Ces approches font aussi montre d'une vision réductionniste : le gène est vu comme une simple molécule, l'organisme comme une somme de gènes et l'espèce comme une somme d'individus. Obtenir un œuf ou un embryon viable est une chose, mais que signifie reproduire « l'écologie de l'espèce », le tissu d'interactions dans lesquelles elle est impliquée ?

Selon moi, la désextinction répond à un fantasme, celui de maîtriser l'existence des espèces ; et n'est pas une avancée vers la protection de la nature. Parler de désextinction est aussi une façon d'alléger la culpabilité environnementale qui nous angosse.

Soit. Mais cette approche de la conservation ne fait que rejouer une tendance ancienne : le recours aux promesses de la technique pour nous sortir d'un mauvais pas. La crise écologique a favorisé des nouveaux récits, au carrefour entre science et technologie, appliqués à la conservation de la biodiversité. La désextinction est l'un des multiples chapitres de ce récit. ■



Vincent DEVICTOR est chargé de recherche du CNRS en biologie de la conservation à l'Institut des sciences de l'évolution de Montpellier. Il est l'auteur de l'Écoblog <http://www.scilogs.fr/ecoblog/>



Retrouvez tous nos blogueurs sur www.scilogs.fr et suivez-les sur les réseaux sociaux.

L'intelligence des céphalopodes

Poulpes, seiches et calmars sont bien plus que les maîtres
du camouflage. Mémoire, apprentissage, innovation, jeux...
Dans de nombreux domaines, ils n'ont rien
à envier à certains vertébrés.

Ludovic DICKEL et Anne-Sophie DARMAILLACQ

© Corbis, images dans l'attente



L'ESSENTIEL

■ Bien que leur cerveau soit très différent de celui des vertébrés, les céphalopodes présentent diverses capacités cognitives comparables.

■ Dotés d'un système de camouflage élaboré, ils l'utilisent pour duper proies, prédateurs et rivaux.

■ Ils adoptent aussi des comportements innovants ou de jeu, et mémorisent diverses informations.

■ Les seiches apprennent même dès le stade embryonnaire en observant leur environnement à travers la membrane de l'œuf.

Ces animaux sont fantômes autant que monstres. Ils sont prouvés et improbables. Ils semblent appartenir à ce commencement d'êtres terribles que le songeur entrevoit confusément par le soupirail de la nuit.

Victor Hugo, Les travailleurs de la mer, 1866

J amais Victor Hugo n'aurait imaginé que, plus de deux siècles après qu'il eut décrit le combat de Gilliat, pêcheur de Guernesey, contre ce « monstre », les citoyens européens considéreraient la pieuvre et ses cousins (seiches, calmars, nautilles) comme des êtres intelligents et sensibles. C'est pourtant bien ce que reflète la dernière mouture de la réglementation européenne sur l'expérimentation animale, en vigueur depuis le 1^{er} janvier 2013.

Désormais, la directive 2010/63/UE, qui définit les conditions selon lesquelles l'expérimentation animale peut être pratiquée dans l'Union européenne, inclut les céphalopodes. Une première mondiale. Ces mollusques cousins des gastéropodes (limaces, escargots) deviennent les seuls invertébrés sur lesquels l'expérimentation est strictement

1. LE POULPE FRANZ, dans l'aquarium de Timmendorfer Strand, en Allemagne. Comment un organisme sans squelette, ayant un système nerveux complexe, trois cœurs et huit bras perçoit-il le monde ?

LES AUTEURS



Ludovic DICKEL, professeur à l'Université de Caen Basse-Normandie, y dirige le groupe Mémoire et plasticité comportementale.

Anne-Sophie DARMAILLACQ est maître de conférences au sein du même groupe.

réglementée (voir l'encadré page 25). Pour valider ses recherches, l'expérimentateur se doit, comme pour le singe, le chien ou le mouton, de respecter le bien-être de ces mollusques en mettant tout en œuvre pour éviter de leur causer souffrance, stress et détresse. Ces nouvelles dispositions éthiques illustrent-elles les signes d'un changement du comportement de l'homme vis-à-vis des « petites bêtes » (insectes, araignées, escargots...) ? Ou peut-être les céphalopodes se distinguent-ils des autres invertébrés par une forme d'intelligence ignorée jusqu'à présent ?

Depuis les années 1950, les comportements de ces animaux sont l'objet de recherches visant à répondre à cette question. Les seiches et les pieuvres sont les plus étudiés des céphalopodes. Les premiers travaux concernaient leur cerveau et, notamment, les structures cérébrales du poulpe (nom commun de la pieuvre *Octopus vulgaris*) impliquées dans l'apprentissage et la mémoire. Plus récemment, des biologistes de tous les continents se sont

intéressés à leurs spectaculaires capacités de changement de couleur et à leur système visuel perfectionné. Les recherches sont loin d'être terminées, mais, déjà, une conclusion s'impose : les céphalopodes sont dotés de capacités cognitives comparables à celles des vertébrés. Camouflage, vision, innovation, tromperie, apprentissage, mémoire, sont des facettes de leur intelligence.

Des spécimens les plus petits (*Idiosepius*, cinq millimètres) aux calmars géants (*Architeuthis sp.*, probablement long de plus de sept mètres), les céphalopodes ont colonisé l'ensemble des mers du globe. Certains se sont adaptés à l'obscurité des abysses, d'autres aux eaux polaires ou encore à la richesse des environnements coralliens. Les quelque 700 espèces de céphalopodes (voir l'encadré ci-dessous) ont toutes en commun d'être des mollusques marins. Prédateurs de coquillages, crustacés et poissons, proies prisées des cétacés et de certains oiseaux marins, elles présentent un répertoire comportemental parmi les plus riches et complexes du règne animal.

LE GROUPE DES CÉPHALOPODES

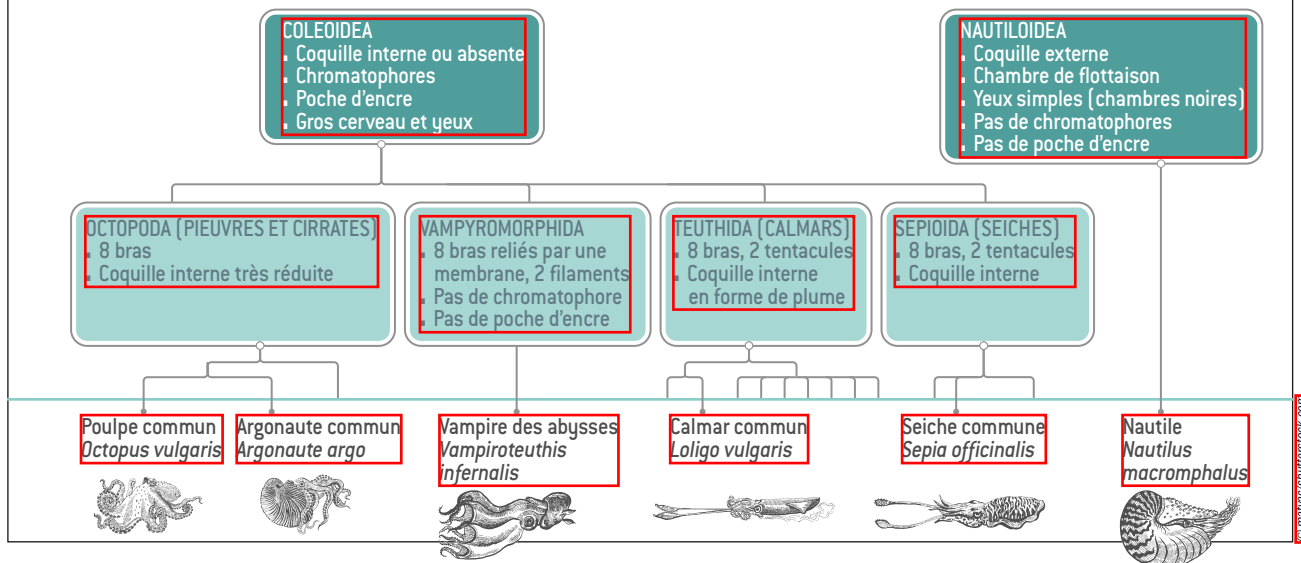
Les céphalopodes sont des mollusques qui ont perdu leur coquille (tel le poulpe) ou chez qui elle a évolué en un organe de flottabilité (telle la seiche) et en « squelette » sur lequel s'appuient les muscles puissants de leur manteau.

Ils ont en commun, entre autres, de se déplacer par rétro-propulsion en envoyant de l'eau

sous pression via un entonnoir ventral qu'ils peuvent orienter dans toutes les directions. Ce groupe est très ancien, bien plus que les poissons : les premiers fossiles de céphalopodes ont environ 500 millions d'années. Leurs ancêtres les plus connus, les ammonites, peuplaient l'ensemble de la planète au Trias et au Jurassique, il y a environ

200 millions d'années. La classe des céphalopodes actuels est subdivisée en Nautiloïdés (dont il ne reste qu'un seul genre, qui présente de nombreux caractères de ses ancêtres du Jurassique) et en Coléoïdés. Ces derniers sont représentés par des animaux ayant huit bras et deux longs tentacules : les Sépioïdés (les seiches, la sépiole...) et les

Teuthoïdés (les calmars). Les céphalopodes comptant huit bras tels le poulpe ou l'argonaute constituent l'ordre des Octopodes. Une seule espèce très étrange et rare occupe une place à part au sein des Coléoïdés, le « calmar venu des enfers » (*Vampyroteuthis infernalis*). Cette espèce relique a été observée dans les grandes profondeurs.



Ce répertoire, elles le doivent à une anatomie particulière.

Au cours de leur évolution, ces mollusques ont pour la plupart perdu leur coquille externe protectrice. Ils ont gagné des bras et des ventouses leur permettant de manipuler des objets avec précision – une capacité limitée par ailleurs à quelques mammifères terrestres tels que les primates ou la loutre. Leur peau peut changer de couleur instantanément. Nageurs efficaces, ils se propulsent en éjectant de l'eau sous pression par un entonnoir mobile situé sous leur ventre. Les déplacements fins sont assurés, chez les calmars et les seiches, par l'ondulation des nageoires qui courent de part et d'autre de leur corps.

Bras, ventouses, peau, entonnoir, nageoires sont contrôlés par un énorme cerveau. Ce dernier, le plus développé parmi les invertébrés, est comparable en taille à celui de certains oiseaux. Les 500 millions de cellules nerveuses du cerveau du poulpe (elles sont sans doute encore plus nombreuses chez la seiche) sont à comparer avec les 90 000 neurones du système nerveux des escargots et de la limace de mer (aplysie) ou aux 950 000 neurones du cerveau d'une abeille. Le poulpe a plus de neurones que le rat ou la souris (qui en comptent 100 à 200 millions), mais la comparaison s'arrête là, tant l'organisation du cerveau des céphalopodes diffère de celle des vertébrés.

Un cerveau dans un corps mou

Le cerveau des céphalopodes est situé entre les yeux et entoure... l'œsophage. Une capsule solide de cartilage le protège et fait office de « boîte crânienne ». Leur cerveau est très structuré. Certaines régions fournissent des réponses motrices simples à des informations sensorielles simples; d'autres intègrent de multiples informations sensorielles et coordonnent des comportements plus complexes tels que la nage. D'autres encore sont impliquées dans des fonctions élaborées telles que l'apprentissage, la mémoire et la prise de décision (voir l'encadré page 26).

Deux lobes dits optiques, situés dans l'axe des yeux, sont impliqués dans de nombreux comportements déclenchés par la vision. Leur taille – deux tiers du volume du cerveau – souligne l'importance des informations visuelles dans la vie des céphalopodes.

La réglementation animale

Les réglementations sur l'utilisation des animaux en expérimentation sont apparues dans certains pays européens (Danemark, Allemagne, Angleterre) au XIX^e siècle. Ce type de régulation s'est étendu dans toute l'Europe, à différents degrés en fonction des pays, jusque dans les années 1980.

C'est en 1986 que la première réglementation paneuropéenne concernant le bien-être des animaux de laboratoire a été appliquée. Cette réglementation concernait les animaux vertébrés, en particulier les rongeurs et les lapins qui constituent environ 80 pour cent des animaux utilisés en laboratoire. Cette directive a été remaniée en 2010 et 2013.

Le chercheur doit à présent mettre tout en œuvre pour optimiser le bien-être des animaux de laboratoire, réduire leur nombre et proposer des méthodes expérimentales alternatives (recherche sur des tissus en culture, modélisation informatique...). Les projets d'expériences sont classés sur une échelle de gravité pour l'animal (inconfort, douleur...) qui doit être

compatible avec l'importance des finalités de la recherche. Les établissements d'expérimentation doivent être agréés par les services vétérinaires compétents. Avant d'être réalisés, chaque protocole expérimental doit être expertisé et validé par des comités d'éthique composés de chercheurs, de membres de la société civile, de vétérinaires et de spécialistes du droit. Des instances de contrôle sont mises en place dans les différents centres de recherche et avec les services vétérinaires compétents pour s'assurer de la conformité des protocoles au cours de leur réalisation.

Un des comportements d'origine visuelle les plus étonnants des céphalopodes est le changement instantané de coloration de la peau en fonction de l'environnement, qui en fait des maîtres du camouflage.

La production de couleurs est fréquente dans le règne animal. Certaines espèces, tel le poisson-grenouille *Antennarius pictus*, se fondent parfaitement dans l'environnement; d'autres animaux, tels que le zèbre, la panthère, l'abeille, le tigre et de nombreux poissons et papillons, portent des motifs géométriques qui trompent leurs proies ou leurs prédateurs en brouillant leur silhouette générale; d'autres encore, tel le poisson scorpion *Pterois volitans*, arborent des couleurs vives qui avertissent d'éventuels prédateurs de leur grande toxicité ou, par exemple chez le paon (*Pavo cristus*), permettent de communiquer avec les congénères, notamment au cours des parades nuptiales. Grâce aux capacités uniques de leur peau, les seiches, poulpes et calmars font tout cela à la fois.

Leur peau est une toile de peintre – une couche de cellules blanches, les leucophores – sur laquelle des millions de cellules contractiles et pigmentées, les chromatophores, sont disposées géométriquement. Par contraction ou dilatation, ces cellules peuvent disparaître ou former de petites taches jaunes, orange, brunes ou noires (voir la figure 2). En fonction des espèces et de leur milieu

de vie, d'autres couleurs sont présentes, telles que le bleu chez la pieuvre à anneaux bleus *Hapalochlaena lunulatus* ou le rouge chez la seiche *Sepia elongata*. La contraction et la coordination de l'activité de ces cellules sont directement commandées par le cerveau. En se contractant ou en se dilatant ensemble, les chromatophores « dessinent » en une fraction de seconde des motifs plus ou moins géométriques, parfois spectaculaires, surtout sur la face dorsale de l'animal.

Entre les leucophores et les chromatophores se situe une couche de cellules particulières, les iridophores. Chaque iridophore présente des centaines de plaques réfléchissantes. En fonction des conditions environnementales, tous ces miroirs microscopiques produisent des irisations ou polarisent la lumière, c'est-à-dire modifient la vibration des ondes lumineuses (voir l'encadré page 28). Ces jeux de lumière sont très intenses. Par exemple, les iridescences sur la face ventrale d'une seiche (*Sepia officinalis*) rendent l'animal difficilement discernable de la surface de l'eau par des prédateurs ou des proies qui se trouveraient sous lui.

Par tous ces mécanismes, les seiches, pieuvres et calmars se camouflent en imitant la couleur et la structure du fond sur lequel ils reposent (voir la figure 3). Même leurs bras sont mis à contribution : en 2012, Alexandra Barbosa, du Laboratoire de

biologie marine de Woods Hole, aux États-Unis, et ses collègues ont montré que les seiches utilisent des indices visuels pour positionner leurs bras parallèlement aux motifs longilignes. Elles peuvent ainsi se fondre parmi des algues, par exemple.

Le camouflage n'est pas leur seule arme. Pour intimider ou tromper ses prédateurs, une seiche peut faire apparaître deux ocelles noirs menaçants à l'arrière de son corps. Les motifs de coloration sont aussi utilisés comme moyen de communication avec les congénères chez les espèces grégaires ou comme signal de qualité au partenaire de reproduction. Chez la seiche commune *Sepia officinalis* et la seiche du pacifique *Sepia latimanus*, par exemple, des zébrures produites par les mâles attirent les femelles.

Devant tant de motifs colorés possibles décrits chez le calmar, la seiche et la pieuvre, difficile d'imaginer que ces maîtres dans l'art du camouflage ne distinguent pas... les couleurs. C'est pourtant bien le cas. En 1981, John Messenger, de l'Université de Sheffield, en Angleterre, a montré que leur rétine ne présente qu'un

seul type de pigment, la rhodopsine, alors qu'au moins deux sont nécessaires à la vision des couleurs. Plus tard, en 2006, Lydia Mäthger, du Laboratoire de biologie marine de Woods Hole et ses collègues en ont apporté la preuve comportementale. Ils ont placé des seiches sur un damier constitué de carrés jaunes et bleus ayant la même intensité lumineuse en niveau de gris (photographié en noir et blanc, le damier apparaît uniforme) : les seiches ont alors arboré la même coloration uniforme (couleur sable) que sur un fond uniformément bleu ou jaune. En revanche, sur un damier noir et blanc, elles présentaient un motif symétrique à deux couleurs (blanc et noir) imitant le damier.

Voir l'invisible

Les mécanismes de perception et de production des motifs colorés sont encore mal connus. Quant aux mécanismes cognitifs intervenant dans le choix, les apprentissages et la mémorisation des motifs colorés à arborer en fonction des contraintes de l'environnement, ils sont encore très peu

explorés. Les motifs de coloration eux-mêmes sont étudiés, car ils permettent d'avoir un accès direct à la perception de l'environnement par l'animal : ils constituent une sorte de système d'imagerie cérébrale naturel ouvrant une fenêtre sur le fonctionnement du cerveau des céphalopodes.

Si les céphalopodes ne voient pas les couleurs, ils ont néanmoins une vision exceptionnelle qui leur permet de distinguer d'autres propriétés des éléments qui les entourent : leurs yeux sont sensibles à la polarisation de la lumière.

La vision en milieu aquatique est très différente de celle en milieu aérien. Les couleurs sont atténuées avec la profondeur : plus on s'enfonce et plus les ondes lumineuses sont absorbées. À partir de quelques mètres de la surface, le jaune, l'orange et le rouge disparaissent ; à 50 mètres, le violet et le vert s'éteignent à leur tour, et seul le bleu reste visible. La présence de particules, de surfaces transparentes ou d'obstacles réfléchissants modifie aussi la lumière incidente et, par conséquent, la perception visuelle. En effet, quand la lumière traverse une surface transparente ou arrive sur une surface

LE SYSTÈME NERVEUX DES CEPHALOPODES

Le système nerveux des céphalopodes – ici une seiche – est constitué d'un « cerveau » (en jaune), et d'un système nerveux « périphérique » (en rose), constitué notamment d'un ganglion stellaire d'où rayonnent des fibres nerveuses géantes. Celles-ci se ramifient en de nombreuses terminaisons qui contrôlent les muscles du manteau et les mouvements des nageoires. Un système de cellules

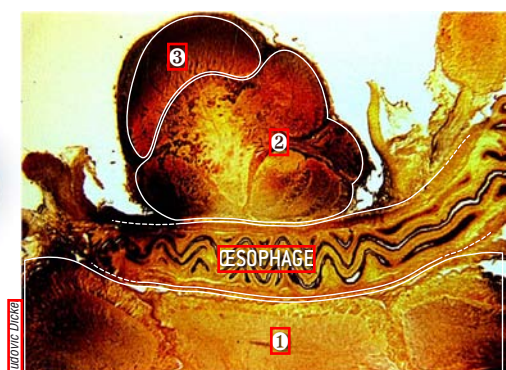
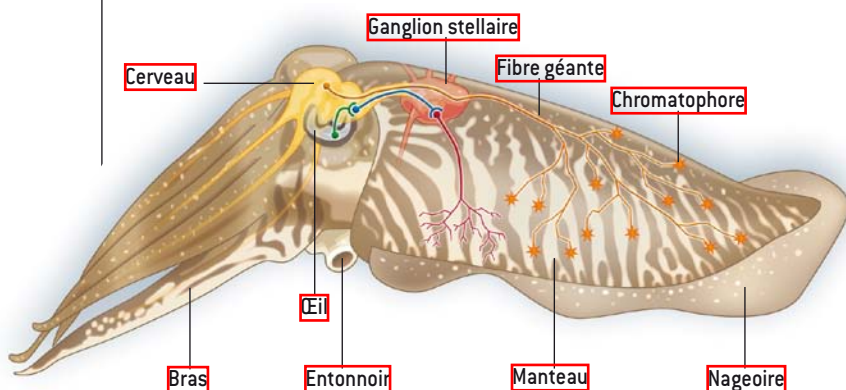
contractiles et pigmentées – les chromatophores – réparties sur le manteau, la tête et les tentacules de l'animal est directement contrôlé par le cerveau via des fibres nerveuses qui traversent le ganglion stellaire.

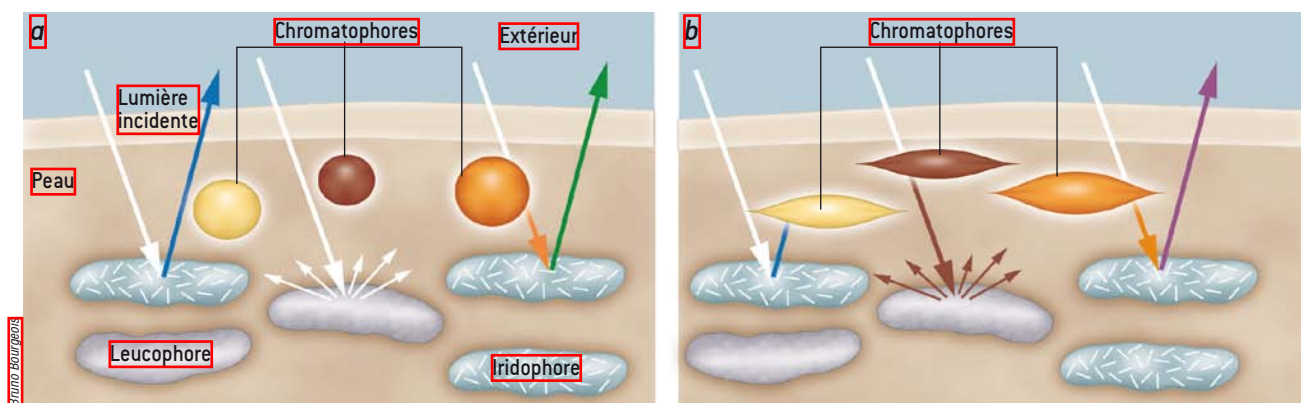
Le cerveau (à droite, coupe longitudinale du cerveau d'une seiche) est fonctionnellement très hiérarchisé. Les structures sous l'œsophage (1) sont impliquées dans l'intégration primaire des

informations sensorielles et la production de réponses motrices simples (comme la moelle épinière des vertébrés). Les structures de part et d'autre et au-dessus de l'œsophage (2) intègrent des informations de différents systèmes sensoriels et coordonnent des séquences comportementales plus complexes (nage, maintien de l'équilibre). Les structures les plus dorsales (3) sont impliquées dans

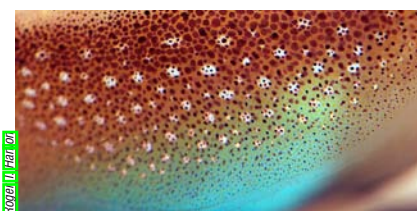
des fonctions élaborées telles que l'apprentissage, la mémoire et la prise de décisions (comme l'hippocampe ou le cortex préfrontal chez les mammifères).

Derrière les yeux, les lobes optiques intègrent toutes les informations visuelles ; ils jouent un rôle dans de nombreux comportements d'origine visuelle, tels que les changements de coloration de la peau ou certains apprentissages visuels.





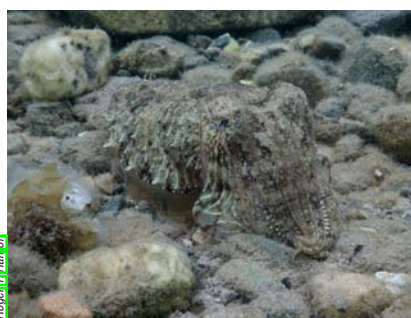
2. LA PEAU DES CÉPHALOPODES (ci-contre celle d'une seiche *Sepia officinalis* vue à la loupe) contient trois types de cellules qui modulent sa couleur : les chromatophores, les leucophores et les iridophores. Les chromatophores, qui contiennent des pigments de diverses couleurs (ici jaune, orange, marron), dessinent divers motifs en une fraction de seconde selon qu'ils se contractent (a) ou se dilatent (b). Ils filtrent aussi la lumière qui les traverse. Les leucophores, blancs, diffusent la lumière incidente dans toutes les directions, ce qui augmente l'intensité de la couleur correspondante. Les iridophores portent à leur surface de petites plaques réfléchissantes orientées aléatoirement, ce qui influe sur la couleur de la lumière.



réfléchissante, elle se polarise (voir l'encadré page 28). La structure particulière de leur rétine permet aux céphalopodes de percevoir cette propriété de la lumière à laquelle nous sommes insensibles. Là où un plongeur ne verra que scintillements, la seiche, elle, distinguera des poissons argentés ou des crevettes transparentes. Capables de détecter ces signaux lumineux depuis leur plus jeune âge, les seiches rendent le camouflage de ces proies inopérant. Percevoir la polarisation de la lumière ajoute une nouvelle dimension à la vision, analogue à l'ajout des couleurs à une image en noir et blanc.

En 2012, nous avons montré que la sensibilité à la polarisation de la lumière permet aussi aux seiches de s'orienter dans l'espace à l'instar de nombreuses espèces d'insectes. Placées dans un labyrinthe en Y, les seiches retrouvent un abri situé à l'extrémité d'un bras aussi bien à l'aide de balises visuelles (des « panneaux de signalisation » noirs et blancs indiquant le bon ou le mauvais chemin) que de la direction de la polarisation lumineuse.

Le développement de cette sensibilité semble dépendre de l'environnement dans lequel évolue l'animal : nous avons montré, en collaboration avec Nadav Shashar, de l'Université Ben Gourion, en Israël, que la seiche commune *Sepia officinalis*, que l'on trouve dans la Manche, perçoit des stimulus lumineux polarisés même dans une eau turbide, contrairement aux seiches vivant dans les eaux claires de la mer Rouge (*Sepia pharaonis*). Enfin, la vision de la lumière



3. DES SEICHES *Sepia officinalis* se fondent dans chacun de ces fonds marins. Les trouvez-vous ? En haut, la seiche arbore un motif uniforme, imitant le duvet de mousse qui recouvre les pierres. En bas, deux seiches ont opté pour des motifs aux contours bien délimités, qui se confondent mieux avec les éléments contrastés du fond.

polarisée permettrait aux seiches de communiquer. Les seiches polarisent elles-mêmes la lumière via les iridophores présents sur leurs bras et sur leur tête. Nous pensons qu'il s'agit de signaux qui peuvent être échangés avec leurs congénères sans éveiller l'attention des prédateurs – une sorte de canal de communication crypté.

Le toucher joue aussi un rôle important. En mai 2014, Binyamin Hochner, de l'Université hébraïque de Jérusalem, et ses collègues ont montré que le poulpe présente un système de reconnaissance chimique de soi qui empêche ses ventouses de se coller à sa propre peau, et ainsi de faire des nœuds avec ses bras.

Imitation et tromperie

Si l'on est ici encore loin d'avoir montré que le poulpe a une « conscience de soi », les céphalopodes présentent une forme d'intelligence qu'illustrent leurs comportements. À l'instar des grands singes ou des corvidés (corbeaux, corneilles), ils sont capables d'utiliser des outils, de manier la duperie ou encore de faire preuve de comportements surprenants. Au cours de plusieurs centaines d'heures de plongée effectuées entre 1999 et 2008, Julian Finn et Mark Norman, du Muséum Victoria, à Melbourne en Australie, et Tom Iregenza, de l'Université d'Exeter, en Angleterre, ont fait des observations étonnantes. Ils ont filmé plusieurs spécimens d'un petit poulpe, *Amphioctopus marginatus*, qu'ils ont surnommé poulpe-noix de coco : l'animal

déambulait dans les eaux indonésiennes à cheval sur deux demi-noix de coco. Le poulpe les utilise comme refuge en cas de danger dans un environnement hostile. Dans l'archipel malais, les biologistes ont aussi observé un poulpe « imitateur », *Thaumoctopus mimicus*, qui se fait passer tantôt pour un poisson plat, tantôt pour une rascasse ou encore pour un serpent de mer. L'imitation n'est pas anodine, car tous ces modèles renferment de puissants venins, ce qu'ils ne manquent pas de signaler en arborant des rayures noires et blanches ostentatoires.

La tromperie peut aussi être destinée à des individus de la même espèce. En Australie, Roger Hanlon, du Laboratoire de biologie marine de Woods Hole, et ses collègues ont observé en milieu naturel que les petits mâles de l'espèce *Sepia apama* trompent les mâles plus gros qui montent la garde auprès des femelles en imitant la coloration des femelles. Cette stratégie de duperie est payante près d'une fois sur deux.

En matière de tromperie, le mâle d'une autre espèce australienne, *S. plangon*, est encore plus fort. Des observations en milieu naturel dans le port de Sydney, ainsi qu'en

BIBLIOGRAPHIE

L. Cartron et al., **Maturation of polarization and luminance contrast sensitivities in cuttlefish (*Sepia officinalis*)**, *J. Exp. Biol.*, vol. 216, pp. 2039-2045, 2013.

J. K. Finn et al., **Defensive tool use in a coconut-carrying octopus**, *Current Biology*, vol. 19, pp. R1069-R1070, 2009.

L. M. Mäthger et al., **Anatomical basis for camouflaged polarized light communication in squid**, *Biology Letters*, vol. 2, pp. 494-496, 2006.

L. Bonnaud et R. Boucher-Rodoni, **Une communication aux motifs changeants**, *Dossier Pour la Science*, n° 34, pp. 18-25, 2002.

laboratoire par Culum Brown, de l'Université Macquarie (Sydney), et son équipe ont montré que les seiches mâles sont capables d'arborer d'un côté de leur corps une coloration typique de femelle face à un rival, tandis qu'ils font la cour à une femelle de l'autre côté, en arborant des couleurs de mâle. Cette tactique est utilisée seulement quand un seul rival est présent, la duperie risquant d'être découverte en présence de plusieurs mâles.

Innovants et joueurs

De telles stratégies de duperie, décrites chez certains oiseaux et mammifères, sont associées à des capacités cognitives élaborées. Il est probable que les comportements sociaux soient un des moteurs de l'évolution et du développement des capacités cognitives chez certains céphalopodes, mais pas seulement. Les capacités d'innovation sont aussi des facteurs corrélés à l'intelligence et à la taille relative du cerveau, et divers comportements innovants ont été décrits chez les poulpes et les seiches. En 2012, par exemple, une photographe amateur a été témoin de l'attaque d'un goéland par un poulpe de près d'un mètre de long (*Enteroctopus dofleini*) dans le port de Victoria, au Canada. Le poulpe a eu raison de l'oiseau en quelques minutes. Ce comportement était innovant, car il n'était pas adopté par tous les membres de l'espèce.

Un autre comportement associé au développement cognitif, principalement chez les oiseaux et les mammifères, mais aussi chez quelques rares poissons et reptiles, est le jeu. Récemment, des comportements de jeu ont été observés chez la pieuvre, notamment par Jennifer Mather, de l'Université de Lethbridge, au Canada, et par Michael Kuba, de l'Université de Jérusalem. Les pieuvres montrent de la curiosité envers des objets nouveaux (de petits cubes en plastiques), se dirigent vers eux, les prennent et les manipulent en les faisant passer d'un bras à l'autre.

Une des particularités des céphalopodes est l'absence de soins parentaux directs aux jeunes. Sauf chez quelques rares espèces tel le nautilus, qui vit 20 ans, les individus de différentes générations ne se rencontrent jamais, car les mâles et les femelles meurent après leur unique et intense saison de reproduction. Comment s'en sortent les jeunes ? Notre équipe est spécialisée dans l'étude de la cognition

Ce que voient les céphalopodes

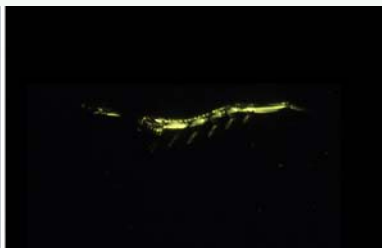
Les animaux qui distinguent les couleurs sont sensibles à différentes parties du spectre lumineux : la lumière peut être représentée par un ensemble d'ondes électromagnétiques caractérisées chacune par une longueur d'onde, dont les yeux distinguent certaines composantes.

Les céphalopodes ne sont pas sensibles aux longueurs d'onde, mais à la polarisation de la lumière. Une onde lumineuse est caractérisée par deux composantes : un champ magnétique et un champ électrique, représentés par deux vecteurs oscillant dans un plan perpendicu-

laire à la direction de propagation de l'onde. La polarisation caractérise la direction dans laquelle oscille le champ électrique. Le champ électrique d'une lumière non polarisée oscille dans toutes les directions. S'il garde une direction fixe, la polarisation est linéaire. S'il tourne autour

de l'axe de propagation, la polarisation est circulaire.

La lumière du Soleil n'est pas ou très peu polarisée. En revanche, elle se polarise quand elle frappe une surface réfléchissante (la surface d'eaux calmes, des plumes mouillées, des écailles de poisson), quand elle est dispersée par des particules ou quand elle traverse une surface transparente, telle une crevette translucide (à gauche). Une seiche distingue ainsi l'animal (à droite, vu avec des filtres polarisés imitant la vision de la seiche).





4. UNE SEICHE MÂLE *Sepia plangon* (à droite) est capable de présenter une coloration attrayante pour une femelle sur un côté et, face à un rival (non montré), d'imiter une femelle sur l'autre côté. Le rival, alors, ne l'attaque pas.



5. DANS L'ŒUF, quelques semaines avant l'éclosion, l'embryon de seiche (ici d'une espèce indonésienne) est une seiche miniature qui voit à travers la membrane et apprend.

périnatale chez la seiche. Depuis une dizaine d'années, l'une de nous (A.-S. Darmaillacq) s'intéresse ainsi aux capacités d'apprentissage précoce. Longtemps, on a cru que les jeunes découvraient le monde après la naissance, mais de nombreuses observations récentes montrent qu'au contraire, les stimulations extérieures sont perçues très tôt dans l'œuf par les embryons de seiche.

Un apprentissage... dans l'œuf

En 2008, A.-S. Darmaillacq a mis en évidence que, quelques semaines avant l'éclosion, environ deux mois après la ponte, les embryons de seiche voient leur environnement à travers la capsule de l'œuf : des seiches qui ont perçu des proies avant l'éclosion ou dans les heures qui l'ont suivie orientent leur préférence vers ces proies, même s'il ne s'agit pas de leur préférence innée. Cet apprentissage, nommé « empreinte alimentaire », permet aux jeunes seiches de ne pas choisir leur proie en faisant des essais au hasard, ce qui pourrait être risqué, mais d'orienter leur choix en fonction des proies disponibles et donc de s'adapter tôt et vite à d'éventuels changements de l'environnement.

L'apprentissage des proies est lui-même élaboré. L'un de nous (L. Dickel) a montré que la perception des proies est d'une grande précision : les seiches les distinguent sur la base de leur contraste ou de leur forme ; elles élaborent aussi des catégories perceptives « crabes » versus « crevettes » et généralisent les caractéristiques apprises

à des proies ressemblantes, en regroupant dans la même catégorie des crabes blancs et des crabes noirs, par exemple.

Les seiches et poulpes adultes sont aussi capables d'apprendre des tâches aussi diverses que s'orienter dans l'espace, ne plus tenter de capturer une proie inaccessible ou au goût désagréable ou encore distinguer des formes ou des textures différentes. Les informations acquises dans ces apprentissages peuvent être retenues sur plusieurs jours consécutifs, signe d'une bonne mémoire à long terme.

Ces découvertes ont toutes contribué à faire connaître les céphalopodes. De monstres insaisissables, ces animaux ont acquis, en Europe du moins, le statut d'êtres sensibles à la douleur physique et psychologique. La révolution des pratiques de la recherche est le signe de l'évolution rapide de la relation de l'homme à l'animal sous toutes ses formes et plus seulement celles qui lui ressemblent. Et la question se posera vite sur la réglementation des pratiques associées à l'exploitation industrielle de ces animaux, telles que la pêche ou l'aquaculture.

Les céphalopodes doivent-ils être considérés comme les seuls invertébrés « sensibles » ou comme les premiers invertébrés ainsi qualifiés ? Les connaissances sur la cognition ou la perception de la douleur avancent vite sur d'autres mollusques, sur l'abeille ou certains crustacés. L'usage de ces modèles est déjà réglementé dans plusieurs pays (Nouvelle-Zélande, Australie, Canada, Norvège...). Certains disent que cette réglementation va trop loin, d'autres prétendent au contraire que le respect de l'animal quel qu'il soit doit passer avant

la recherche scientifique. Signe des temps, ces débats, jusque-là anecdotiques bien que passionnés, émergent maintenant au niveau du législateur et du chercheur. Dans plusieurs pays européens, des laboratoires travaillant sur les céphalopodes ont commencé des recherches pour combler le manque de connaissance sur le bien-être de ces animaux (douleur, anesthésie, effets des conditions d'élevage, stress...). Car pour une fois, la loi est allée plus vite que la science !

En 1991, un groupe de travail de l'Institut britannique d'éthique médicale a proposé six critères pour considérer qu'un animal ressent de la douleur physique. Deux d'entre eux sont avérés chez les céphalopodes : ces animaux ont un cerveau très développé et répondent de façon persistante à des stimulations potentiellement douloureuses. En revanche, la présence des quatre autres critères n'est que « probable » : récepteurs à la douleur, voies nerveuses directes conduisant les informations douloureuses de ces récepteurs au cerveau, récepteurs aux substances opioïdes (système antidouleur endogène) et efficacité d'analgésiques qui atténuent la douleur chez les autres espèces.

La douleur psychologique et la « conscience » sont plus difficiles à évaluer. Elles sont au cœur des études de certains chercheurs, tels que J. Mather, ou David Edelman, de l'Institut des neurosciences de San Diego. Néanmoins, les faits sont déjà là : les krakens monstrueux des Victor Hugo, Jules Verne et autres romanciers du XIX^e siècle ont laissé la place à des êtres sensibles, joueurs et intelligents. ■

Le Silicène

sur les traces du graphène

Le silicène est un nouveau matériau constitué d'une unique couche d'atomes de silicium. Parce qu'il allie les caractéristiques de cet élément et les propriétés électroniques du graphène, il pourrait conduire à de nombreuses d'applications.

Un diamant ne ressemble guère à une mine de crayon, l'un est rare et cher, l'autre banal et bon marché. Pourtant, ils sont tous deux composés d'un seul type d'atomes : le carbone. Seul diffère l'agencement des atomes de carbone, c'est-à-dire la structure cristalline. L'exemple est bien connu, mais illustre qu'une simple différence de structure cristalline suffit à conférer aux matériaux des propriétés optiques, mécaniques, de conduction électrique ou thermique spécifiques. Comme le diamant et le graphite des mines de crayon – deux formes dites allotropes du carbone –, de nombreux éléments chimiques présentent plusieurs formes cristallines. L'étain, par exemple, existe sous forme d'étain « blanc », le métal usuel. Quand la température est inférieure à -50°C , il se transforme en étain « gris » semi-conducteur et pulvérulent.

Il est assez rare de découvrir de nouveaux allotropes. Pour le carbone, on se souvient de la découverte par Harry Kroto, Robert Curl et Richard Smalley du fullerène, une molécule quasi sphérique constituée

de 60 atomes de carbone. Ces chimistes ont reçu le prix Nobel de chimie en 1996 pour cette découverte. Les fullerènes ont trouvé de nombreuses applications en chimie notamment.

En 2004, un autre allotrope du carbone a suscité l'émotion : le graphène. Dans ce matériau, les atomes de carbone adoptent une structure hexagonale plane, en nid d'abeilles, et forment une monocouche atomique : c'est un matériau bidimensionnel. Les physiciens Andre Geim et Konstantin Novoselov, de l'Université de Manchester, l'ont obtenu par exfoliation d'un cristal de graphite : ils ont détaché les couches d'atomes de carbone les unes après les autres à l'aide d'un ruban adhésif et ont fini par obtenir un feuillet constitué d'une unique couche d'atomes de carbone. Leurs « expériences particulièrement innovantes » sur ce matériau bidimensionnel ont valu à leurs inventeurs le prix Nobel de physique en 2010.

Le graphène présente des propriétés exotiques, donnant lieu à des phénomènes

Guy Le Lay

quantiques étranges, qui tiennent essentiellement au fait que, dans ce carbone bidimensionnel, les porteurs de charge qui conduisent le courant se déplacent à une vitesse importante, ce qui permet d'envisager de nouvelles applications.

Or du carbone au silicium, il n'y a qu'une case dans le tableau périodique des éléments : juste au-dessous du carbone, on trouve le silicium. Cet élément est très utilisé dans l'industrie électronique en raison de ses propriétés de semi-conducteur. Il a été tellement étudié et utilisé que personne n'imaginait en découvrir un nouvel allotrope. Pourtant, en 2009, une forme cristalline inédite a été découverte : le silicène. Les atomes sont agencés en un réseau

électronique. En effet, toute l'industrie de l'électronique repose principalement sur le silicium. Par conséquent, le silicène s'y intégrerait naturellement. L'émergence d'une électronique fondée sur le graphène imposerait de changer tous les processus de fabrication de circuits électroniques à semi-conducteurs. L'investissement serait colossal et le succès pas assuré. Cela justifie qu'une attention toute particulière soit portée au silicène aussi bien par les chercheurs que par les industriels.

Nous n'en sommes pas encore au stade de l'industrialisation. Le silicène a été synthétisé il y a seulement cinq ans et nous commençons à en préciser les caractéristiques. En effet, sa synthèse est plus

hexagonal en nid d'abeilles, formant une monocouche atomique de silicium, à l'image du graphène. Ce nouveau matériau bidimensionnel, prévu théoriquement en 1994 par Kyozauro Takeda, de l'Université Waseda à Tokyo, et Kenji Shiraishi, de l'Université de Nagoya, ne semble pas exister à l'état naturel. Il a été synthétisé pour la première fois en 2009 par Patrick Vogt, de l'Université technique de Berlin, alors qu'il travaillait pour quelques mois dans mon équipe à Marseille.

Aujourd'hui, de nombreuses équipes font des recherches, essentiellement théoriques, sur le silicène. Pourquoi un tel engouement ? Ce matériau a une structure proche de celle des films bidimensionnels de carbone, et les physiciens espèrent qu'il combine les propriétés spécifiques du silicium et celles que présente son cousin le graphène.

Illustrant les enjeux liés à ces allotropes du carbone et du silicium, la Commission européenne a identifié l'étude du graphène – avec celle du cerveau humain – comme un des principaux projets de recherche pour les dix années à venir. Les recherches liées au graphène seront financées à hauteur d'un milliard d'euros sur dix ans. Mais loin de se cantonner au seul graphène, le projet s'étend aux matériaux analogues, « au-delà du graphène », et le silicène occuperait une place de choix.

Le silicène, peut-être même plus que le graphène, pourrait avoir des applications en physique des semi-conducteurs et serait plus facile à utiliser en microé-

lectronique. En effet, toute l'industrie de l'électronique repose principalement sur le silicium. Par conséquent, le silicène s'y intégrerait naturellement. L'émergence d'une électronique fondée sur le graphène imposerait de changer tous les processus de fabrication de circuits électroniques à semi-conducteurs. L'investissement serait colossal et le succès pas assuré. Cela justifie qu'une attention toute particulière soit portée au silicène aussi bien par les chercheurs que par les industriels.

Comme nous l'avons évoqué, on peut préparer des films de graphène par exfoliation, mais cette technique ne s'applique pas au silicène : le silicium ne présente pas, à l'état naturel, de structure cristallographique en feuillets équivalant à celle du carbone dans le graphite. Nous avons utilisé une autre technique, l'épitaxie, couramment utilisée pour fabriquer, entre autres, des plaquettes de silicium de grande qualité. Du silicium brut est chauffé à haute température dans une enceinte sous vide. Les atomes arrachés s'adsorbent à la surface du substrat. Les premiers atomes adsorbés forment des sites de nucléation sur lesquels se fixent d'autres atomes. Les forces électrostatiques entre les atomes de silicium et atomes du substrat influent sur la position des atomes qui se déposent, et l'on obtient un réseau cristallin régulier.

Pour le silicène, le choix du substrat est déterminant, notamment la structure cristalline de sa surface. Nous avons utilisé un monocristal d'argent qui présente, en surface, une structure hexagonale. De surcroît, d'après les calculs théoriques, quatre mailles du réseau cristallin de l'argent correspondent quasiment à trois mailles de silicène. Cela signifie que les contraintes

L'ESSENTIEL

■ Le silicène est constitué

d'une monocouche d'atomes de silicium. Sa structure est proche de celle du graphène.

■ Le silicène a été synthétisé pour la première fois en 2009.

■ Ses propriétés

pourraient combiner celles du graphène et celles du silicium, élément essentiel des dispositifs électroniques.

■ Les chercheurs

commencent à mesurer ses caractéristiques : sa structure cristalline et ses propriétés électroniques.

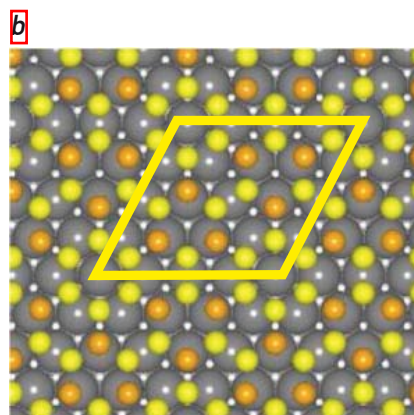
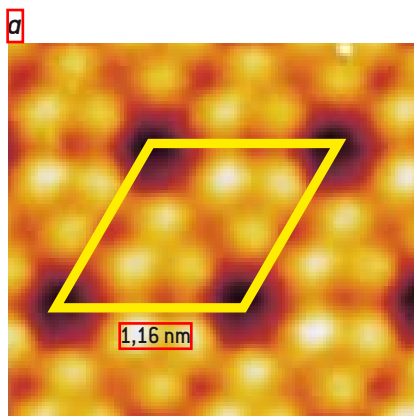
qui s'exercent entre les atomes des deux réseaux sont faibles, ce qui favorise la synthèse du silicène.

Il y a encore un autre avantage à utiliser un substrat d'argent avec le silicium. J'ai eu l'occasion d'étudier lors de travaux antérieurs le système qui consistait à inverser le rôle de l'argent et celui du silicium. En effet, j'ai étudié pendant plusieurs années la croissance épitaxiale de films ultraminces d'argent sur la surface hexagonale d'un substrat de silicium monocristallin porté à quelque 400 °C. Je cherchais à caractériser les propriétés structurales et électroniques de l'interface ainsi formée. Cette dernière est particulièrement intéressante, car elle est abrupte : les deux types d'atomes ne se mélangent pas pendant la croissance, ni par diffusion d'atomes de métal dans le semi-conducteur et *vice versa*, ni par formation d'alliages.

Un film ondulé

Ainsi, sachant que la relation d'épitaxie théorique était favorable et que l'interface présentait des propriétés intéressantes, nous espérions pouvoir synthétiser du silicène en inversant la démarche que j'avais suivie lors de mes travaux antérieurs. Nous avons déposé sur la surface hexagonale d'un cristal d'argent des atomes de silicium sublimés (le solide passe directement à l'état gazeux). Ces atomes sont libérés par un barreau de silicium porté à 1200 °C par effet Joule – la chaleur est produite par le passage d'un courant électrique dans le barreau. L'expérience a lieu dans une enceinte où règne un vide poussé, ou ultravide.

Or la majorité des chimistes pensaient que le silicène ne pourrait être synthétisé dans ces conditions. Pourtant, d'excellentes couches de graphène sont obtenues par condensation de carbone sur la surface d'un métal, tel le cuivre, porté à haute température. Pourquoi cette opération est-elle plus difficile avec le silicium ? À cause de la géométrie des liaisons atomiques du silicène, un peu différente de celle des liaisons atomiques du graphène. Dans le graphène, les atomes de carbone dessinent une structure en nid d'abeilles plane. Au contraire, les calculs théoriques sur le silicène montrent que les liaisons entre les atomes de silicium ne sont pas toutes situées dans un même plan (voir l'encadré page ci-contre). Ainsi, l'assemblage



1. LE SILICÈNE observé au microscope à effet tunnel ne montre pas la structure en « nid d'abeilles » établie par la théorie mais une structure en « pétales de fleurs » (a). Sur une modélisation (b), on observe que le substrat d'argent (en gris) déforme la structure du silicène libre. Certains atomes de silicium qui reposent sur des atomes d'argent sont repoussés vers le haut (en orange) tandis que d'autres occupent des creux présents dans le substrat (en jaune). Cela signifie que la microscopie à effet tunnel visualise seulement les atomes de silicium les plus éloignés du substrat. Les atomes de silicium les plus proches du substrat et les atomes d'argent ne sont pas visibles. Les losanges matérialisent la même cellule de base.

des atomes de silicium, dans le cas du silicène « libre » – c'est-à-dire en l'absence des contraintes imposées par un substrat – crée une ondulation régulière dans le réseau : la structure en nid d'abeilles est déformée. On peut alors définir deux ensembles parmi les atomes du réseau, qui constituent deux sous-réseaux, formant chacun un plan. Ces deux plans parallèles sont distants d'environ 0,04 nanomètre.

Nid d'abeilles ou pétales de fleurs ?

Toutefois, comme on ne sait pas fabriquer du silicène libre, sa synthèse requiert un substrat. La structure non plane du silicène est-elle un obstacle pour sa formation sur le substrat ? Au contraire ! L'ondulation du silicène favoriserait son adaptation à divers substrats, son réseau s'ajustant à celui du substrat : la maille change d'orientation, voire de taille, par une sorte d'effet accordéon.

Et, en effet, nous avons synthétisé du silicène sur un substrat d'argent. Les conditions pour obtenir les meilleurs résultats correspondaient à une température du substrat d'environ 220 °C dans un vide extrême d'environ 10^{-8} pascal ou 10^{-13} fois la pression atmosphérique normale. L'orientation de la maille du silicène est alors parallèle à celle de l'argent et le rapport d'épitaxie est exactement de trois mailles de silicène pour quatre mailles de l'argent de surface (nous notons cette relation d'épitaxie $3 \times 3 / 4 \times 4$). La géométrie du silicène ainsi obtenu diffère un peu de celle du silicène libre théorique, en raison des contraintes imposées par le substrat. C'est aussi le cas pour l'argent dont la surface est modifiée par la présence du silicium.

Nous avons analysé la structure de l'interface avec un microscope à effet tunnel ainsi qu'au microscope à force atomique. Les observations révèlent un arrangement en « pétales de fleurs » qui confirme indirectement la présence du silicène (voir la figure 1a). En effet, le microscope à effet tunnel détecte seulement les atomes les plus proches de la pointe du microscope. En outre, les atomes du substrat d'argent déforment la structure ondulée théorique du silicène et certains atomes de silicium sont plus hauts que les autres (voir la figure 1b). Par conséquent, les atomes de silicium inférieurs ne sont pas visibles, car ils ne contribuent quasiment pas à l'effet tunnel.

Le motif en nid d'abeilles apparaît donc incomplet, et c'est la raison pour laquelle nous observons un motif en pétales de fleurs.

Si nous n'avons encore jamais vu directement son réseau, comment s'assurer que nous synthétisons bien du silicène ? Il faut chercher d'autres signatures de ce matériau. Une première piste consiste à modéliser la forme que prend le silicène sur un substrat d'argent et à la comparer à la structure révélée par un microscope à effet tunnel.

La modélisation en renfort

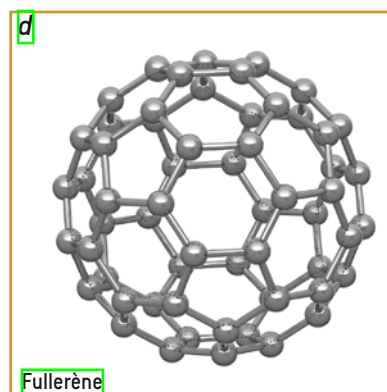
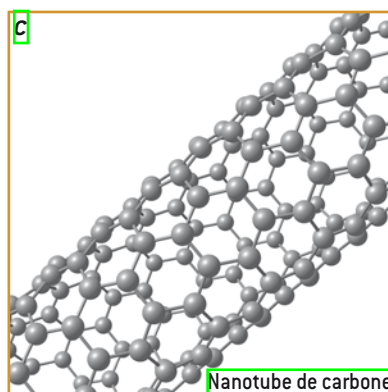
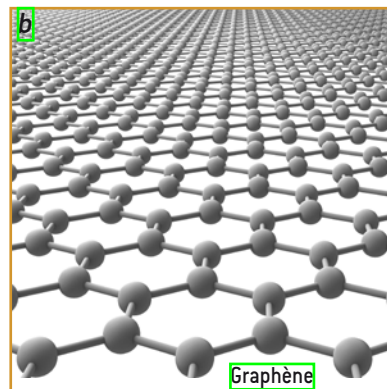
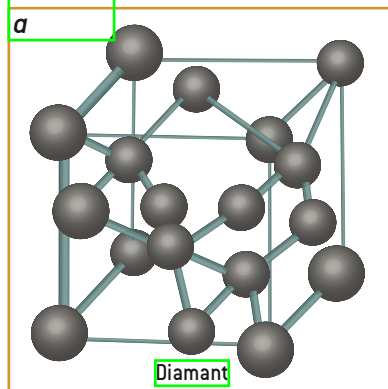
Pour modéliser l'arrangement des atomes de silicium, nous partons de la structure du silicène libre, puis la « déposons » sur le substrat d'argent. Le programme prend en compte les interactions des atomes de silicium et d'argent, et, en minimisant l'énergie totale du système, propose un système à l'équilibre. Dans quelle mesure ce silicène épitaxié théorique correspond-il au silicène obtenu expérimentalement ? Utilisant ce type de simulation, Bénédicte Ealet, du Centre interdisciplinaire de nanoscience de Marseille, a montré que le silicène modélisé dans ces calculs donne une image en pétales de fleurs en accord avec ce que nous observons.

La deuxième approche consiste à mesurer certaines caractéristiques spécifiques du silicène. Si les mesures correspondent à ce que prévoit la théorie, ce serait une autre façon de confirmer qu'il s'agit bien de silicène. Par exemple, dans le silicène libre, les atomes peuvent être répartis en deux groupes qui forment deux plans parallèles. La configuration sans ondulations du graphène correspondrait au cas limite où les deux plans sont confondus. L'écart entre les deux plans du silicène impliquerait des propriétés électroniques différentes entre le silicène et le graphène. Toutefois, la distance entre les deux plans est suffisamment petite pour que le silicène présente, en théorie, des propriétés de conduction électrique très proches de celles du graphène.

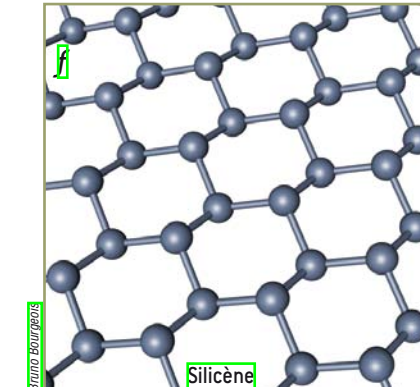
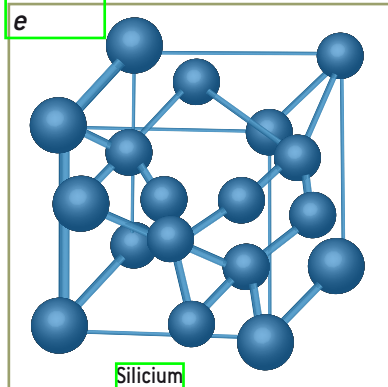
Il est cependant très difficile de mesurer les propriétés électriques du silicène. Pour évaluer la conductivité du silicène épitaxié, nous avons utilisé avec Bruno Granddier, de l'Institut d'électronique, de microélectronique et de nanotechnologie de Lille, une sonde à quatre pointes, mais il est impossible de le faire sur une seule

ALLOTROPES DU CARBONE ET DU SILICIUM

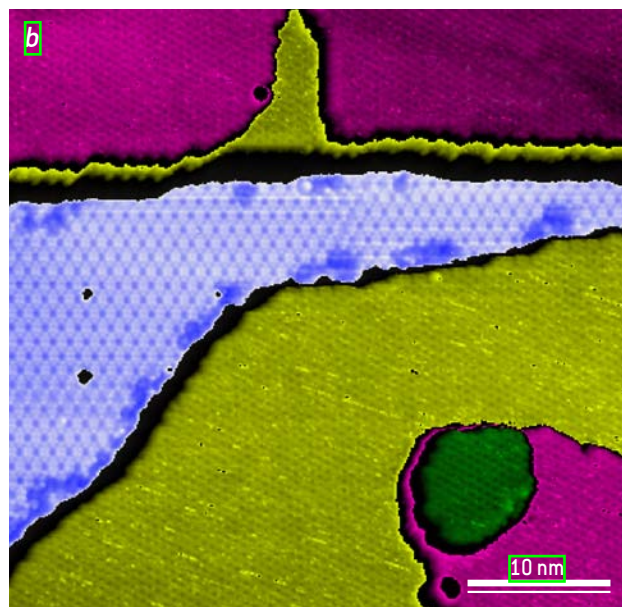
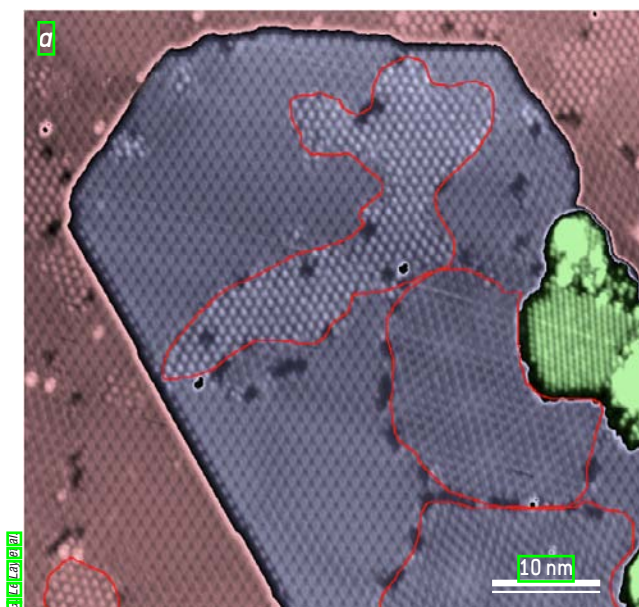
Carbone



Silicium



Les matériaux constitués uniquement d'atomes de carbone existent sous des formes très différentes, qualifiées d'allotropes. Les plus connus sont le diamant (**a**) et le graphite qui est une superposition de couches bidimensionnelles, où les atomes dessinent des structures hexagonales en « nid d'abeilles ». En 2004, les physiciens Andre Geim et Konstantin Novoselov ont isolé une couche unique de graphite, le graphène (**b**). Les propriétés de conduction du graphène laissent entrevoir de nombreuses applications en électronique. Chaque allotrope présente des propriétés différentes : les nanotubes (**c**) ont une conduction thermique et une conduction électrique élevées ainsi qu'une résistance mécanique importante. Les fullerènes (**d**) ont de nombreuses applications en chimie. Le silicium existe principalement sous la forme cristalline similaire à celle du diamant (**e**). Récemment, des physiciens ont réussi à synthétiser une monocouche de silicium comparable au graphène, mais moins plane, le silicène (**f**). Ce dernier pourrait associer des caractéristiques du graphène et du silicium.



2. LES IMAGES DU SILICÈNE au microscope à effet tunnel révèlent des caractéristiques variées de ce matériau. On observe des domaines dont l'orientation des mailles diffère [a, les zones bleues entourées de rouge]. La méthode permet aussi de visualiser des empilements de plusieurs couches de silicène [b, en bleu, vert, rose et vert foncé].

couche de silicène sans créer un court-circuit avec le substrat d'argent, qui est un très bon conducteur.

Il est donc nécessaire d'utiliser une structure multicouche où plusieurs couches de silicène sont superposées. L'utilisation du silicène multicouche est beaucoup plus pratique et ses propriétés sont intrinsèques, c'est-à-dire que le substrat n'a pas d'influence sur les couches éloignées.

Avec Paola De Padova et Claudio Quaresima, de l'Institut sur la structure de la matière de Rome, ainsi que Maria-Carmen Asensio et José Avila, du Centre de rayonnement synchrotron SOLEIL en Île-de-France, nous avons utilisé une autre technique, la spectroscopie de photoélectrons, pour étudier les propriétés électroniques du silicène réel. Cette méthode consiste à exposer le matériau à un faisceau intense de photons à une longueur d'onde précise pour lui arracher des électrons qui renseignent sur sa structure électronique. Nous avons ainsi montré que le silicène multicouche se comporte comme un semi-métal, comme le graphène en simple couche : les porteurs de charge s'y déplacent à des vitesses très importantes (voir l'encadré page 36). Un semi-métal présente, dans une certaine mesure, une configuration électronique intermédiaire entre un métal et un semi-conducteur.

Par ailleurs, Alessandro Molle, de l'Institut de microélectronique et des micro-

L'AUTEUR



Guy LE LAY est professeur émérite à l'Université d'Aix-Marseille et au Laboratoire de physique des interactions ioniques et moléculaires, unité mixte du CNRS.

BIBLIOGRAPHIE

E. Scalise *et al.*, Two-dimensional Si nanosheets with local hexagonal structure on a MoS₂ surface, *Advanced Materials*, vol. 26, n° 13, pp. 2096-2101, 2014.

P. Vogt *et al.*, Synthesis and sheet resistance of multilayer silicene, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 104, 021602, 2014.

A. Resta *et al.*, Atomic structures of silicene layers grown on Ag(111), *Nature Scientific Reports*, vol. 3, p. 2399, 2013.

P. Vogt *et al.*, Silicene : compelling experimental evidence for graphenelike two-dimensional silicon, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 108, P. 155501, 2012.

systemes à Milan, et Michel Houssa, de l'Université catholique de Louvain, et leurs équipes ont obtenu une autre signature caractéristique du silicène réel en monocouche par spectroscopie Raman, où l'on mesure en réflexion la réponse optique du silicène sur lequel on focalise un faisceau laser. Le signal réfléchi par la monocouche est similaire à celui mesuré pour le graphène, confirmant une nouvelle fois que leurs propriétés électroniques sont très voisines.

Un matériau facile à doper

Le graphène est un matériau plutôt inerte, difficile à doper et, par conséquent, à transformer en semi-conducteur. Ainsi, l'ajout d'hydrogène transforme le graphène en semi-conducteur, mais le matériau est instable. Au contraire, le silicène réagit facilement avec d'autres éléments, ce qui permet, en principe, de le doper et de lui conférer les propriétés d'un semi-conducteur. Cela explique l'intérêt que suscite le silicène pour l'industrie de l'électronique.

La forte réactivité du silicène a cependant un inconvénient majeur : il s'oxyde facilement à l'air. Il réagit beaucoup moins à l'oxygène que le silicium usuel, mais il faut néanmoins prendre en compte ce phénomène lors de l'utilisation du silicène. Deux solutions permettent d'éviter cette difficulté. La première consiste à superposer

plusieurs dizaines de couches pour protéger les couches inférieures. Récemment, l'équipe de P. De Padova, en collaboration avec mes collègues Eric Salomon, Thierry Angot et moi-même, a montré que seules les couches les plus externes s'oxydent après une exposition à l'air ambiant pendant 24 heures. La seconde approche consiste à encapsuler le silicène en le recouvrant d'un matériau protecteur. Ainsi, l'équipe d'A. Molle y est parvenue en le recouvrant *in situ* d'un film d'aluminium, qui s'oxyde partiellement à l'air, mais protège le silicène situé au-dessous.

Une structure en terrasses

Nous avons aussi étudié le réseau cristallin du silicène. La structure $3\times 3/4\times 4$ est la plus stable et la première à avoir été observée pour le silicène, mais d'autres apparaissent et peuvent éventuellement coexister sur la même surface d'argent pour des températures un peu plus élevées. Cela reflète une certaine « flexibilité » du silicène, liée à sa forme ondulée et à l'effet accordéon d'adaptation.

Schématiquement, ces domaines semblent correspondre à des rotations du réseau de silicène par rapport à la couche dite nominale $3\times 3/4\times 4$, suivies d'une extension d'environ deux pour cent de la dimension de la maille. Mais cette légère dilatation du silicène conduit à de nouvelles relations d'épitaxie de la couche vis-à-vis du substrat. Et la densité en atomes de silicium étant environ quatre pour cent inférieure à celle de la structure nominale, les diverses propriétés de conduction pourraient changer.

Nous avons observé expérimentalement ces différents domaines cristallins avec Andrea Resta et d'autres collègues (voir la figure 2a), mais nous n'avons pas encore mesuré les caractéristiques de ces structures. Cependant, la présence de plusieurs domaines sur un même substrat implique celle de frontières entre les domaines, ce qui perturbe la circulation des charges électriques. En effet, les charges peuvent être réfléchies sur ces défauts ou y rester piégées. L'idéal serait d'avoir un système présentant une seule structure cristalline.

Quand on synthétise du silicène multicouche, les feuillets se superposent en se

décalant l'un par rapport à l'autre, à la façon des cultures en terrasses des rizières d'Asie du Sud ou des bancaous de Provence, des parcelles de cultures en gradins délimitées par des murs de pierre.

Ces feuillets présentent une nouvelle structure, notée $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ tournée de 30 degrés par rapport à la structure nominale $3\times 3/4\times 4$ du silicène en première couche. Nous avons aussi constaté que pour les domaines différents de la structure nominale, la structure suivante est également $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$, mais l'orientation diffère. Souvent, des domaines de structures cristallines différentes coexistent sur la première couche. Dans la deuxième couche, on a une structure unique, mais l'orientation des domaines varie en fonction de celle des domaines sous-jacents.

Nous ignorons encore pourquoi nous obtenons la configuration unique $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$, mais il est probable que les interactions du silicium et de l'argent deviennent négligeables et que ce soit la structure intrinsèque du silicène – définie par les seules interactions des atomes de silicium – qui impose cette maille. La structure atomique $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ a une signature

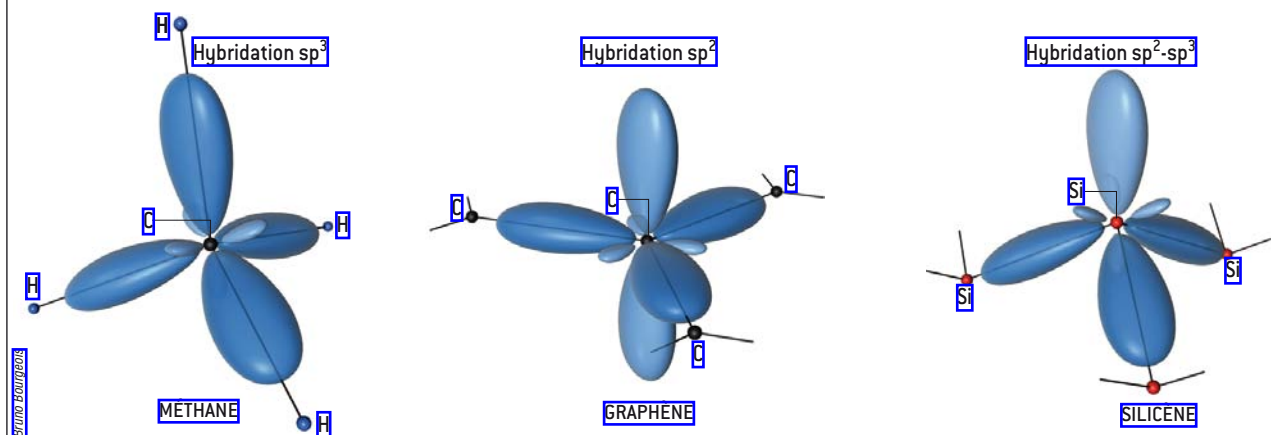
UNE STRUCTURE ÉLECTRONIQUE PARTICULIÈRE

Le carbone et le silicium appartiennent à la même colonne du tableau périodique des éléments. Ils possèdent tous les deux quatre électrons de valence dont l'occupation de l'espace est décrite par des fonctions mathématiques, les orbitales atomiques, solutions des équations de la mécanique quantique. Les orbitales se distinguent notamment par leur forme et leur énergie.

Par exemple, les orbitales *s* sont sphériques et les orbitales *p* sont constituées de deux lobes raccordés au noyau de l'atome. Pour déterminer la géométrie des liaisons entre atomes, il faut prendre en compte l'hybridation – ou mélange – des orbitales. Pour les orbitales *s* et *p*, plusieurs configurations sont possibles. La configuration stable du méthane (CH_4) est notée sp^3 , les quatre orbitales

séparées de 109,5 degrés forment un tétraèdre. Le graphène adopte l'hybridation sp^2 . Trois liaisons occupées par les électrons sont dans un plan et sont séparées par des angles de 120 degrés ; une quatrième orbitale est perpendiculaire au plan. Le silicène, quant à lui, présente une hybridation intermédiaire entre sp^2 et sp^3 . Cette configuration est responsable de sa forme ondulée.

Dans le silicène, la configuration mixte sp^2 - sp^3 des atomes confère au matériau une plus grande réactivité chimique que celle du graphène. Les atomes du silicène se lient plus facilement à d'autres éléments. En dopant le silicène, c'est-à-dire en lui ajoutant d'autres atomes, il est possible de le transformer en semi-conducteur. Le graphène, inerte, est plus difficile à doper.



Les porteurs de charge rapides du graphène et du silicène

Les porteurs de charge dans le graphène se comportent comme s'ils avaient une masse nulle. Ils se distinguent ainsi des électrons usuels dans les solides : on parle spécifiquement de fermions de Dirac.

Ces porteurs de charges peuvent se déplacer à de grandes vitesses correspondant à des mobilités élevées, pouvant atteindre 10^6 centimètres carrés par volt et par seconde à température ambiante, soit 1000 fois les valeurs de mobilité dans le silicium.

Le graphène et le silicène sont des semi-métaux : la largeur de la bande d'énergie interdite est nulle entre la bande de valence – la bande d'énergie la plus élevée et totalement occupée par des électrons à zéro kelvin – et la bande de

conduction – la bande d'énergie juste au-dessus, vide ou partiellement remplie à zéro kelvin. Mais cela ne suffit pas pour expliquer la vitesse des porteurs de charge. Il faut s'intéresser à la relation de dispersion, qui relie l'énergie de la particule et sa quantité de mouvement. Elle caractérise le comportement du porteur de charge lors de sa propagation dans un matériau.

On peut obtenir des relations de dispersion théoriques en étudiant différents types de porteurs de charge dans les cristaux. Ainsi, des porteurs

libres non relativistes sont décrits à partir de l'équation de Schrödinger. La relation de dispersion est alors quadratique, c'est-à-dire que l'énergie est proportionnelle au carré de la quantité de mouvement.

L'équation de Dirac prend en compte la théorie de la relativité restreinte. La relation de dispersion est linéaire pour des porteurs de charge de masse nulle à basse énergie, près des points de contact entre la bande de conduction et la bande de valence : l'énergie est alors proportionnelle à la vitesse.

En mesurant la relation entre l'énergie et la quantité de mouvement, on détermine la nature des porteurs de charge. Pour s'assurer que le silicène contient des fermions de Dirac,

les physiciens utilisent la spectroscopie de photoélectrons. Cette technique repose sur l'effet photoélectrique, découvert par le physicien allemand Heinrich Hertz et interprété par Albert Einstein en 1905. On utilise un faisceau lumineux d'énergie réglable dans le domaine des ultraviolets ou des rayons X pour arracher des électrons au matériau. L'énergie des photons et l'énergie cinétique des électrons recueillis indiquent l'énergie des électrons dans le silicène et l'angle d'émission des électrons donne leur quantité de mouvement. Il est ainsi possible de mesurer la relation de dispersion du silicène et de démontrer la présence de fermions de Dirac.

spectroscopique qui correspond à des propriétés électroniques très voisines de celles du graphène obtenu par épitaxie sur la surface d'un métal. Nous l'avons mis en évidence au Centre de rayonnement synchrotron SOLEIL, et le groupe de Kehui Wu de l'Académie des sciences de Pékin l'a fait par spectroscopie avec un microscope à effet tunnel. La hauteur des « terrasses » successives est d'environ 0,3 nanomètre, ce qui correspond à une distance assez importante entre couches de silicène. En effet, la distance entre deux atomes de silicium est de 0,235 nanomètre pour la liaison covalente forte dans le silicium usuel. La distance de 0,3 nanomètre implique des liaisons différentes entre couches de silicène, probablement de type van der Waals, comme dans le cas des feuillets du graphène.

Des applications qui restent à découvrir

Aujourd'hui, on sait fabriquer du silicène et on peut en étudier les propriétés. Mais son utilisation industrielle, notamment en électronique, se heurte à une difficulté expérimentale importante : la nature du substrat. Le silicène en monocouche et son substrat sont indissociables, les deux maté-

riaux étant fortement liés. Pour les séparer, il faudrait utiliser des réactions chimiques qui, vraisemblablement, détruiraient le film de silicène. L'argent est le substrat métallique le plus utilisé, mais il en existe seulement deux autres connus à ce jour.

Des chercheurs de l'Académie des sciences de Pékin, autour de Hong-Jun Gao, avec Werner Hofer de l'Université de Liverpool, ont réussi à synthétiser une monocouche de silicène par épitaxie sur un cristal d'iridium (mais ce métal est cher et sa surface plus difficile à préparer). Antoine Fleurence, alors postdoctorant dans le groupe de Yukiko Yamada-Takamura de l'Institut avancé de sciences et technologie du Japon, JAIST, a découvert qu'une couche de silicène peut croître à la surface d'un film de diborure de zirconium (ZrB_2 , une céramique métallique) préalablement formé sur un substrat de silicium. Les atomes de silicium diffusent à travers le film de diborure de zirconium et forment une monocouche de silicène.

Jusqu'à récemment, seuls ces trois substrats étaient utilisés, mais ils sont tous les trois métalliques ! Pour les applications en micro- ou nanoélectronique, il est indispensable d'utiliser un substrat isolant ou semi-conducteur pour éviter tout court-circuit. L'obtention de systèmes

multicouches résistants à l'air, comme nous les avons évoqués, est très encourageante, car ils pourraient faciliter leur transfert sur d'autres substrats non métalliques. Ainsi, l'équipe d'A. Molle a récemment obtenu des couches bidimensionnelles de silicium de structure locale hexagonale sur une surface de sulfure de molybdène, MoS_2 , qui est un semi-conducteur. Ce résultat ouvre la voie à des applications potentielles pour des diodes ou des transistors à effet de champ bidimensionnels ou des dispositifs qui, par empilement de matériaux à deux dimensions, auraient des propriétés électroniques ou optiques intéressantes.

Le graphène a ouvert la voie à de nombreux matériaux bidimensionnels prometteurs. On trouve par exemple le germanène, constitué uniquement de germanium, ou encore les dichalcogénures qui associent des métaux de transition (tels le molybdène ou le tungstène) et du soufre ou du sélénium. Les chimistes cherchent à identifier toutes leurs propriétés, des moyens de les doper et des applications industrielles. Aujourd'hui, le champ est vierge, mais le silicène, qui présente la structure du graphène et qui est constitué de silicium, l'élément roi de l'électronique, sera sans doute le premier sur la liste de ces applications. ■

SciLogs

La nouvelle communauté de blogueurs scientifiques francophones

De blogs en blogs,
explorez la science en direct
avec ceux qui la font,
commentez les articles
et participez au débat !

Complexités

Vos raisonnements et conceptions seront remis en question par **Jean-Paul Delahaye**, auteur de la rubrique Logique et Calcul dans *Pour la Science*. Dans son blog, il présente des jeux et énigmes mathématiques, des paradoxes logiques et numériques et des nouveautés en informatique.



Signal sur bruit

Découvrez les réflexions de l'astrophysicien **Richard Taillet**. Matière noire, énergie sombre et autres découvertes en physique et astrophysique... votre soif de connaissance sera assouvie !

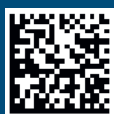


Best of Bestioles

Explorez chaque semaine les merveilles du monde animal, dans le blog de **Loïc Mangin**, rédacteur en chef adjoint de la revue *Pour la Science*. Insectes, mammifères, crustacés, amphibiens et bien d'autres n'auront bientôt plus de secrets pour vous !



Retrouvez aussi les autres communautés « SciLogs » :
déjà plus de 140 blogueurs scientifiques à l'international !



Connectez-vous
maintenant
pour découvrir
www.SciLogs.fr !



Suivez les dernières actualités
des blogueurs également
sur les réseaux sociaux

Proposé par **POUR LA SCIENCE**

La fin de l'âge sombre

Michael Lemonick

Après l'émission du rayonnement du fond diffus cosmologique, l'Univers a progressivement été plongé dans l'obscurité jusqu'à l'apparition des premières étoiles. À quoi ressemblaient ces astres et quand sont-ils apparus ?

LES PREMIÈRES ÉTOILES de l'Univers étaient gigantesques, parfois plus de 100 fois plus massives que le Soleil. Elles auraient contribué à dissiper le brouillard qui enveloppait l'Univers primordial avant de mourir dans des explosions de supernovae, telles celles figurées sur cette vue d'artiste.

L'ESSENTIEL

- L'Univers a connu une période d'obscurité avant l'apparition des premières étoiles, très différentes des astres actuels.
- Les premières sources de lumière ont réionisé l'Univers, arrachant des électrons aux atomes neutres d'hydrogène.
- Différents objets ont pu réioniser l'Univers : les premières étoiles, les galaxies ou des trous noirs supermassifs.
- Les astronomes étudient cette époque reculée en observant les galaxies, les quasars, les sursauts gamma...

L'Univers est né il y a environ 13,8 milliards d'années. Il a rapidement pris la forme d'un plasma brûlant, dense et bouillonnant de noyaux atomiques et d'électrons. S'il y avait eu quelqu'un pour l'observer, il aurait vu une purée de pois d'une clarté aveuglante.

Après 380 000 ans, l'Univers en expansion était suffisamment refroidi pour que les noyaux et les électrons s'associent en atomes neutres : c'est la recombinaison. Le brouillard s'est dissipé, les photons ont pu voyager à travers l'espace pour parvenir jusqu'à nous aujourd'hui sous la forme du rayonnement du fond diffus cosmologique. Mais après cette émission de lumière intense, l'Univers a été plongé progressivement dans l'obscurité, en l'absence de sources de lumière. Le cosmos est entré dans ce que l'on nomme l'âge sombre.

Et même quand les premières étoiles ont commencé à s'allumer, elles brillaient surtout dans la portion ultraviolette du spectre. Or l'hydrogène gazeux, quand il se forme, a tendance à absorber ce type de rayonnement, l'empêchant de se propager. L'Univers a échangé son brouillard primordial brûlant contre une brume froide et sombre.

Il fallut attendre plusieurs centaines de millions d'années pour que ce brouillard se lève à son tour. Pendant longtemps, le mécanisme en jeu est resté mystérieux. La fin de l'âge sombre était-elle le fait des premières étoiles, dont la lumière intense aurait progressivement arraché les électrons de l'hydrogène dans un processus dit de réionisation ? Ou l'énergie nécessaire pour la réionisation avait-elle été apportée par le rayonnement que libérait le gaz chaud englouti par les trous noirs ?

Quand les premières étoiles se sont allumées

Pour comprendre comment l'Univers est sorti des âges sombres, les astronomes sont partis à la recherche des objets cosmiques les plus vieux afin d'étudier leur nature et leur origine. Quand les premières étoiles se sont-elles allumées, et à quoi ressemblaient-elles ? Comment les étoiles se sont-elles assemblées pour former des galaxies, et comment ces galaxies ont-elles donné naissance aux trous noirs supermassifs qui se nichent presque toujours en leur cœur ? À quel stade de cette progression des étoiles aux galaxies et aux trous noirs la réionisation a-t-elle eu lieu ?

Les travaux sur ces questions ont débuté dans les années 1960, mais seuls les modèles numériques et les télescopes les plus récents sont assez puissants pour offrir quelques réponses : les premiers en simulant l'émergence et l'évolution des premières étoiles de l'Univers, les seconds en recueillant des lueurs émises par l'Univers à une époque où les premières galaxies étaient encore très jeunes.

Il y a dix ans environ, les astronomes pensaient comprendre comment la première génération d'étoiles

AGENCE FRANCE PRES

était apparue. Lors de la recombinaison, les atomes d'hydrogène et d'hélium – produits dans les premières minutes de l'Univers – qui emplissaient le cosmos étaient uniformément répartis dans l'espace. En revanche, la matière noire, dont les physiciens pensent qu'elle est constituée de particules invisibles et non identifiées à ce jour, avait déjà commencé à s'agréger dans des nuages qu'on désigne sous le nom de halos, et qui font en moyenne entre 10^5 et 10^6 masses solaires. La gravité régnant dans ces halos a attiré l'hydrogène et l'hélium. Le gaz, devenant de plus en plus dense et chaud, s'est embrasé et a commencé à émettre de la lumière : c'étaient les premières étoiles de l'Univers.

En principe, les étoiles géantes de la première génération, connues des astronomes sous le nom d'étoiles de Population stellaire III, auraient pu fragmenter le voile d'hydrogène gazeux et réioniser l'Univers. Mais ce scénario dépend beaucoup des caractéristiques de ces étoiles qui ont aujourd'hui disparu et n'ont jamais été observées. Si elles n'étaient pas assez brillantes ou avaient une durée de vie trop courte, elles n'auraient pas permis la réionisation.

Les astronomes ont pensé qu'elles devaient toutes être gigantesques, pesant chacune environ 100 fois la masse du Soleil (voir l'encadré page ci-contre). En effet, quand un grumeau de gaz s'effondre sous l'effet de la gravité, il s'échauffe, créant ce que l'on nomme une pression de radiation, qui s'oppose à la gravité ; si l'étoile ne peut pas évacuer cette chaleur, la pression de radiation empêche l'effondrement de la matière, et un cœur d'étoile se forme où s'amorce la fusion nucléaire.

Des étoiles de composition primordiale

Or les premières étoiles étaient constituées essentiellement d'hydrogène et d'hélium, qui sont relativement inefficaces pour évacuer la chaleur. Les étoiles similaires au Soleil renferment des traces d'autres éléments tels que l'oxygène et le carbone, qui permettent au nuage parent de se refroidir et de se contracter (voir l'encadré page ci-contre). Par conséquent, une protoétoile des débuts de l'Univers aurait accumulé beaucoup de gaz, devenant plus massive qu'une étoile

actuelle, avant de former un cœur dense où les réactions de fusion se seraient déclenchées. Or ces réactions repoussent une partie du gaz environnant vers l'espace.

Mais une étoile pourrait se former d'une autre façon. Thomas Greif, de l'Université Harvard, a développé des simulations complexes de formation stellaire. Celles-ci n'incluent pas seulement la gravité, mais aussi des rétroactions de l'hydrogène soumis à une pression croissante à mesure que le gaz s'effondre. En prenant en compte ces effets, Th. Greif a montré que le nuage peut se fragmenter pour donner un ensemble d'étoiles de quelques dizaines de masses solaires. Selon que la fragmentation est importante ou limitée, les étoiles sont plus ou moins grosses, élargissant la gamme de masses possibles.



Ces différences de taille impliquent une variabilité énorme de la durée de vie possible des premières étoiles, et donc du moment où la réionisation a pu avoir lieu. Les étoiles géantes de 100 masses solaires ou plus consomment vite leur combustible nucléaire et meurent jeunes. Des étoiles plus petites utilisent leurs réserves lentement. Dans ce cas, le processus de réionisation aurait été lent, s'étendant sur plusieurs centaines de millions d'années.

Quelle que soit leur taille, toutes ces étoiles auraient achevé leur existence en explosant sous forme de supernovae avant de s'effondrer en trous noirs. Et ces trous noirs (peut-être plus encore que les étoiles dont ils sont issus) auraient pu alimenter le moteur de la réionisation.

Les trous noirs avaient avec voracité le gaz environnant. Lors de sa chute, le gaz est comprimé et chauffé à des températures de plusieurs millions de degrés. Il est si chaud que, tandis que la majeure partie du gaz finit par disparaître dans le trou noir, une partie est rejetée dans l'espace sous forme de jets, qui brillent tant que leur lumière est visible aux confins du cosmos. On nomme ces objets des quasars.

Des années 1960 aux années 1990, les quasars ont été les seuls moyens de sonder l'Univers primordial. Au début, les astronomes n'avaient aucune idée de leur nature. Les quasars ressemblent à des étoiles proches de la Terre, mais leur spectre présente un énorme décalage vers le rouge (cet effet est dû à l'expansion de l'Univers qui étire les longueurs d'onde de la lumière). Ces décalages vers le rouge indiquent que les quasars sont très lointains. Mais cela implique aussi qu'ils doivent briller bien plus qu'une simple étoile pour être visibles à cette distance. Le premier à être découvert, 3C 273, a un décalage vers le rouge de 0,16. En prenant en compte un modèle d'expansion de l'Univers, il est possible de faire correspondre le décalage vers le rouge à la distance parcourue par la lumière et donc à l'époque de son émission. Ainsi, ce quasar a commencé à émettre de la lumière il y a environ 2,4 milliards d'années.

Puis des quasars présentant un décalage vers le rouge égal à 2 ont été repérés, ce qui les situe à plus de dix milliards d'années. En 1991, Maarten Schmidt, James Gunn et Donald Schneider, à l'Observatoire Palomar en Californie, ont trouvé un quasar ayant un décalage vers le rouge de 4,9, qui date donc d'il y a 12,5 milliards d'années, soit juste un peu plus d'un milliard d'années après le Big Bang. Les analyses du spectre (voir l'encadré page 43) de ce quasar montrent que l'Univers était déjà réionisé quand la lumière de ce quasar a commencé son périple vers la Terre.

Pendant l'essentiel des années 1990, personne n'a réussi à trouver un quasar plus éloigné. Cet échec n'était pas imputable aux instruments : le télescope spatial Hubble et les télescopes Keck à Hawaï ont été inaugurés au début des années 1990, ce qui a considérablement augmenté la capacité des astronomes à observer l'Univers profond. La raison tient au fait que les quasars sont des objets rares. Ils ne jaillissent que des trous noirs les plus massifs parmi les supermassifs. Et pour que nous puissions les voir, il faut que leurs jets de gaz soient dirigés précisément vers nous.

De plus, ces jets naissent quand un trou noir avale activement du gaz. Ce phénomène a connu son maximum d'activité à un décalage vers le rouge compris entre 2 et 3,

quand les galaxies étaient, en moyenne, plus riches en gaz qu'elles ne le sont aujourd'hui. Pour les temps les plus reculés, le nombre de quasars diminue rapidement.

Ce n'est qu'en l'an 2000, quand le programme SDSS (*Sloan Digital Sky Survey*) a commencé à fouiller méthodiquement une grande portion du ciel avec les plus grands détecteurs disponibles alors, que le record a été battu. « Le programme SDSS a été extraordinairement fructueux pour trouver des quasars lointains », explique Richard Ellis, astronome à l'Institut de technologie de Californie. « On a trouvé une quarantaine ou une cinquantaine de

L'AUTEUR



Michael LEMONICK est journaliste scientifique pour le site *Climate Central*.

quasars ayant des décalages vers le rouge supérieurs à 5,5. »

Mais le programme n'a pas pu aller beaucoup plus loin qu'une poignée de quasars présentant des décalages vers le rouge compris entre 6 et 6,4, et même à cette distance, il n'y avait pas trace d'hydrogène neutre.

La découverte en 2012 d'un quasar à décalage vers le rouge de 7,085, par le relevé *Infrared Deep Sky Survey* au télescope infrarouge UKIRT à Hawaï, a enfin apporté les observations prévues. Les astronomes ont montré qu'une petite quantité d'hydrogène neutre a absorbé une

LES ETOILES GEANTES DE L'UNIVERS JEUNE

Pourquoi les premières étoiles étaient-elles si grosses ? Toutes les étoiles se livrent à un exercice d'équilibre cosmique : la gravité tend à les rendre aussi compactes que possible, mais la pression de radiation au sein de l'étoile s'oppose à la gravité et maintient l'étoile volumineuse. En comparant la formation stellaire dans l'Univers moderne avec la formation stellaire dans l'Univers primordial, on commence à comprendre pourquoi les premières étoiles étaient si massives.

La formation stellaire aujourd'hui

Les galaxies modernes sont jonchées d'ingrédients tels que le carbone, l'oxygène et la poussière qui évacuent bien la chaleur. La pression de radiation est faible. Cela implique qu'un nuage de poussière qui s'effondre peut se contracter jusqu'à ce que son cœur soit si dense que l'hydrogène y subisse une fusion thermonucléaire. Une fois la fusion amorcée, l'énergie souffle les couches externes du nuage en effondrement, laissant derrière une étoile relativement petite.

Le matériau s'accumule

Le gaz se contracte

La fusion s'amorce

Les couches externes sont soufflées

Le matériau s'accumule

Le gaz se contracte

Le matériau continue à s'accumuler

La fusion s'amorce

La formation stellaire des débuts

L'Univers primordial ne contenait ni carbone, ni oxygène, ni poussière, seulement de l'hydrogène, de l'hélium et quelques traces de lithium. L'hydrogène ne se refroidit pas très efficacement. Quand les nuages de gaz ont commencé à s'effondrer, la densité des premières protoétoiles est restée faible à cause de la pression de radiation de l'hydrogène chaud. Les nuages de gaz ont continué à accumuler toujours davantage de gaz – pouvant dépasser la centaine de masses solaires. C'est seulement à ce stade qu'ils ont atteint une chaleur et une densité suffisantes pour que s'enclenche la fusion.

MICHAEL LEMONICK

partie du rayonnement ultraviolet de cet objet céleste. Ce quasar, ULAS J1120+0641, qui émit sa lumière environ 770 millions d'années après le Big Bang, a enfin permis aux astrophysiciens d'aborder l'ère de la réionisation cosmique, mais, même si près du Big Bang, l'essentiel de l'hydrogène neutre avait déjà été détruit.

Toutefois, il est possible que ce quasar se trouve dans une région pauvre en vestiges d'hydrogène neutre, et que la plupart des autres quasars situés à une telle distance

aient été complètement masqués. Il est tout aussi possible qu'ULAS J1120+0641 se trouve dans une région particulièrement dense et que la réionisation ait été déjà complète ailleurs. En l'absence d'autres exemples, les astronomes ne peuvent pas se prononcer, et les chances de trouver suffisamment de quasars à cette distance pour faire une étude statistique fiable sont maigres.

ULAS J1120+0641 a néanmoins beaucoup de choses à apprendre aux astronomes. Pour commencer, R. Ellis souligne

que le nombre de quasars décroît si vite avec la distance qu'il est inconcevable que les trous noirs massifs soient une source de rayonnement suffisante pour avoir réionisé l'Univers. Par ailleurs, le trou noir qui alimente ce quasar doit avoir une masse équivalente à un milliard de soleils pour libérer la quantité d'énergie qui lui permet d'être visible à une telle distance. «Il est presque impossible de comprendre comment il a pu se former en si peu de temps», ajoute R. Ellis.

Les métaux : des premières étoiles à l'Univers actuel

La théorie du Big Bang décrit la naissance de l'Univers et précise que l'hydrogène et l'hélium ont été produits dans les premières minutes avec seulement des traces d'éléments plus lourds que les astrophysiciens nomment des métaux.

Dans le scénario de formation des premières étoiles, décrit par Michael Lemonick, ces astres sont dépourvus de métaux, contrairement aux étoiles actuelles. L'absence de métaux dans les nuages de gaz qui se sont effondrés pour former les premières étoiles explique pourquoi ces astres étaient si chauds et massifs. Voyons quel a été le rôle précis de l'absence de métaux dans la naissance de ces étoiles et leur évolution, ainsi que les conséquences pour les observations.

La nucléosynthèse primordiale décrit les réactions nucléaires à l'œuvre dans les premières minutes de l'Univers. Cette théorie prévoit que l'hydrogène et l'hélium sont produits majoritairement, avec des traces infimes de métaux. Ce scénario a été confirmé par des mesures difficiles sur des nuages de gaz qui ont peu évolué depuis le Big Bang.

Les calculs théoriques indiquent que la structure, la taille et les propriétés d'une étoile sont comparables à celles des étoiles actuelles lorsque la métallicité – le rapport des densités des métaux et de l'hydrogène – est de l'ordre de 10^{-10} ou 10^{-9} . Une étoile est

donc considérée comme dépourvue de métaux si sa métallicité est inférieure. Aujourd'hui, les mesures sur les étoiles les plus pauvres en métaux dans le halo de la Voie lactée donnent une métallicité de l'ordre de 10^{-7} soit au moins deux ordres de grandeur au-dessus de ce qu'on envisage pour les premières étoiles. Cela résume toute la difficulté d'une telle mesure.

Les premières étoiles étaient composées principalement d'hydrogène et d'hélium (une composition «primordiale» sans métaux). Cela a influencé leur évolution et leur structure de deux façons. D'abord, le nuage de gaz s'est effondré sous l'effet de la gravité et s'est échauffé. Un tel nuage peut se refroidir et se fragmenter selon divers processus. Mais les nuages primordiaux n'ont pu évacuer la chaleur que par des émissions d'hydrogène moléculaire, un processus peu efficace. Ces nuages étaient donc plus chauds que les nuages observés aujourd'hui. Et ils ne se sont peut-être pas fragmentés autant pour former de petits grumeaux qui ont donné naissance à de petites étoiles.

Par ailleurs, lorsque le nuage de gaz s'effondre, la densité augmente jusqu'à ce que des réactions de fusion nucléaire s'amorcent dans son cœur. Les premières étoiles ont puisé leur énergie surtout d'un processus nucléaire peu efficace, la chaîne p-p (qui correspond à la fusion de quatre noyaux d'hydrogène pour former de l'hélium). Dans les étoiles actuelles, d'autres réactions nucléaires plus efficaces sont possibles, mais elles nécessitent la présence de métaux, même en petites quantités. Par conséquent, une étoile primordiale s'effondre plus sur elle-même qu'une étoile actuelle, jusqu'à ce que l'énergie produite par le cœur suffise pour contrebalancer la gravité. Les premières étoiles devaient donc être plus chaudes, plus brillantes et plus denses que les étoiles actuelles et avoir un spectre lumineux spécifique. Leur masse était de l'ordre de quelques masses solaires à plusieurs centaines (la masse moyenne des étoiles dans les galaxies actuelles est environ une demie masse solaire). Cela expliquerait aussi pourquoi les premières étoiles n'ont pas été détectées. En effet, plus une étoile est massive, plus sa durée de vie est courte. Les premières étoiles avaient une durée de vie comprise entre un et quelques millions d'années. Les premières étoiles auraient donc

disparu assez vite à une époque trop reculée pour nos télescopes (environ 500 millions d'années après le Big Bang).

Les premières étoiles ont émis un fort rayonnement ultraviolet ionisant, comparable à de petits quasars. Ce rayonnement a progressivement ionisé le gaz du milieu intergalactique, créant des sphères croissantes d'hydrogène ionisé. Le processus était terminé pour l'hydrogène à un décalage vers le rouge de 6,5.

Les premières étoiles ont participé à la réionisation de l'hydrogène, mais elles ont aussi produit des quantités importantes de métaux dans l'Univers, permettant l'apparition des nouvelles générations d'étoiles. Les premières étoiles ont produit tous les éléments jusqu'au fer, et les éléments plus lourds lors de leur mort sous la forme de supernova. Ces métaux se sont alors dispersés dans les galaxies et le milieu intergalactique, ouvrant la voie aux étoiles modernes. L'enrichissement en métal de l'Univers par les premières étoiles implique aussi que ces dernières ne devaient pas être trop massives, sinon elles auraient toutes fini en trous noirs, ce qui aurait empêché la transition vers un Univers peuplé d'étoiles de petite masse.

– **Aparna Venkatesan**
Maître de conférences
de l'Université de San Francisco

Et pourtant il s'est formé. Abraham Loeb, directeur du Département d'astronomie de Harvard, fait remarquer que si une étoile de 100 masses solaires s'est effondrée en trou noir quelques centaines de millions d'années après le Big Bang, il est concevable que ce trou noir ait crû jusqu'à former un quasar, si les conditions étaient favorables. Mais pour ce faire, il faudrait qu'il ait été alimenté en continu, ce qui semble difficile. Un quasar brille tellement et produit tant d'énergie qu'il expulse le gaz de son voisinage. Sans une réserve de gaz à proximité, le quasar devient momentanément sombre, ce qui permet au gaz de s'accumuler à nouveau, jusqu'à ce qu'il puisse se « rallumer », et expulser de nouveau son combustible. « Ainsi, il y a toujours une notion de cycle d'activité », souligne A. Loeb. « Le trou noir ne peut croître que pendant des durées limitées. » Mais des trous noirs peuvent aussi fusionner, ce qui accélérerait leur croissance.

Au moment même où la traque des quasars lointains s'essouffait, la recherche de galaxies toujours plus proches du Big

Bang accélérât. Le plus important des déclencheurs a été une image, le « champ profond de *Hubble* ». Il a été photographié en 1995, quand Robert Williams, alors directeur de l'Institut scientifique du télescope spatial, a utilisé une prérogative de son poste, le « temps discrétionnaire du directeur », pour pointer *Hubble* sur une zone apparemment vide du ciel pendant une trentaine d'heures cumulées, afin de voir les objets pâles qui pouvaient s'y trouver. Des astronomes très sérieux ont essayé de le convaincre que c'était une perte de temps, se rappelle l'actuel directeur Matt Mountain, « qu'il ne verrait rien ».

Il y a bien longtemps, dans une galaxie lointaine

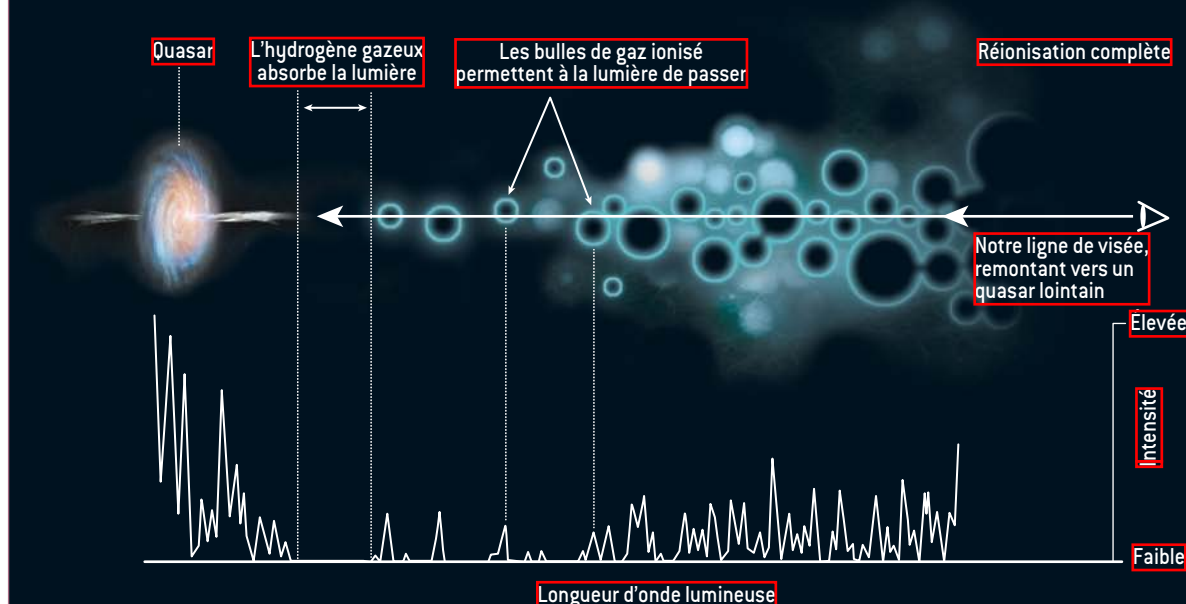
En fait, le télescope a détecté plusieurs milliers de petites galaxies peu brillantes, dont beaucoup étaient parmi les plus lointaines jamais observées. Les images suivantes du champ profond (réalisées à l'aide d'un nouvel instrument, le *Wide Field Camera 3*, installé lors d'une mission de maintenance

en 2009 et 35 fois plus efficace que son prédécesseur) en ont trouvé encore davantage. « Nous sommes passés de quatre ou cinq galaxies ayant un décalage vers le rouge de 7 ou plus à plus d'une centaine », explique Daniel Stark de l'Université d'Arizona et collègue de longue date de R. Ellis. L'une d'entre elles, décrite par R. Ellis, D. Stark et leurs collègues en 2012, semble atteindre un décalage vers le rouge de 11,9, soit moins de 400 millions d'années après le Big Bang.

Comme le quasar détenteur du record d'ancienneté, ces jeunes galaxies peuvent en apprendre beaucoup aux astronomes sur la répartition de l'hydrogène intergalactique à l'époque. Quand les observateurs regardent le flux de lumière ultraviolette émis par ces galaxies, il manque une fraction notable de ce qu'ils attendaient, signe d'une absorption par l'hydrogène neutre qui les entoure. Cette fraction absorbée diminue progressivement quand on regarde des galaxies de plus en plus proches de la Terre, jusqu'à ce que, environ un milliard d'années après la naissance de l'Univers, le cosmos devienne complètement transparent.

LA QUÊTE DES QUASARS

Les quasars sont parmi les objets les plus brillants de l'Univers primordial, visibles à plus de dix milliards d'années-lumière de distance. Quand la lumière issue d'un quasar traverse l'Univers en direction de nos télescopes, on constate deux phénomènes. D'une part, la longueur d'onde de lumière est étirée par l'expansion de l'Univers : le spectre se décale progressivement vers le rouge au cours de la propagation de la lumière. D'autre part, l'hydrogène atomique absorbe à une longueur d'onde lumineuse particulière. Les astronomes peuvent mesurer l'absorption de la lumière en fonction de la longueur d'onde pour voir comment la densité de l'hydrogène neutre s'est modifiée au fil du temps. Ils ont ainsi trouvé que les bulles isolées de gaz ionisé sont devenues plus grosses et plus fréquentes à mesure que l'Univers évoluait.



En résumé, non seulement il existait des galaxies susceptibles d'être la source du rayonnement ionisant, mais ces galaxies révèlent aussi quand l'Univers a effectué sa transition de l'état neutre à l'état entièrement ionisé. Cependant, si vous prenez la centaine de galaxies découvertes jusqu'à présent ayant un décalage vers le rouge supérieur à 7 et que vous extrapolez au ciel entier, vous n'aurez pas assez de rayonnement ultraviolet pour ioniser tout l'hydrogène neutre. L'énergie nécessaire ne peut pas venir des trous noirs non plus, étant donné la difficulté de produire des trous noirs supermassifs en un temps limité.

Néanmoins, la réponse pourrait être assez simple. Certes, elles nous apparaissent très pâles, mais les galaxies que nous avons réussi à apercevoir à la limite de détection de *Hubble* sont les plus brillantes de leur époque. Il doit y avoir à cette distance beaucoup d'autres galaxies qui sont trop peu brillantes pour être vues avec le meilleur des télescopes existants. Selon R. Ellis, la

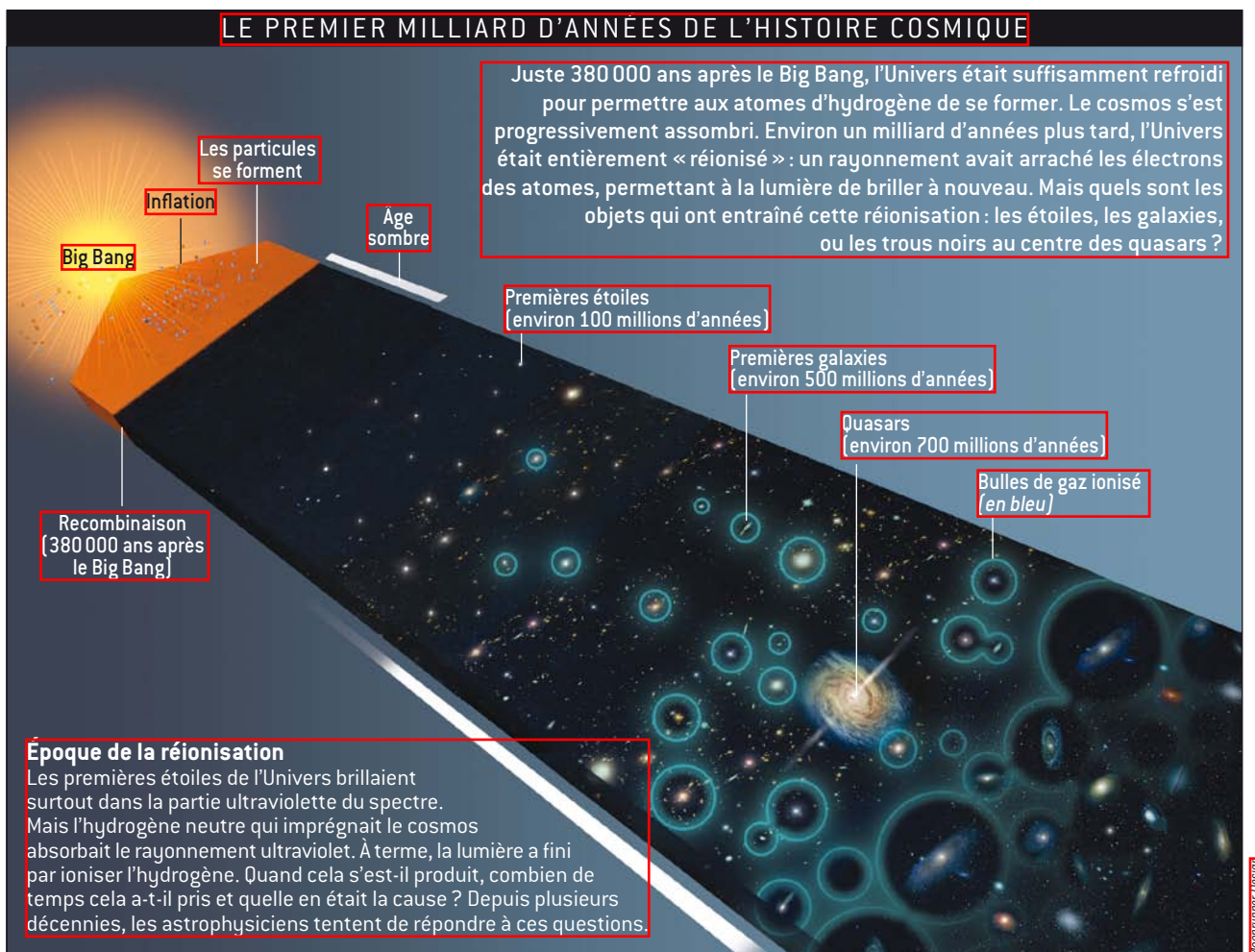
plupart des astronomes pensent maintenant que ce sont les galaxies qui ont fait l'essentiel du travail de réionisation de l'Univers.

Quant à l'aspect des galaxies juvéniles et au moment où elles se sont allumées, « nous n'en sommes pas encore là », admet D. Stark. « Les galaxies que nous voyons sont assez petites, et elles ont l'air beaucoup plus jeunes que les galaxies qui ont été étudiées en détail un à deux milliards d'années plus tard. » Mais elles avaient déjà jusqu'à 100 millions d'étoiles, et leur mélange de couleurs (après correction pour tenir compte du décalage vers le rouge de leur lumière) suggère que leurs étoiles sont, en moyenne, plus rouges que l'on ne s'y attendrait avec une galaxie très jeune. Ces objets semblent former des étoiles depuis plus de 100 millions d'années. Le télescope *Hubble* n'a pas tout à fait permis aux astrophysiciens de voir la première génération d'étoiles. Le télescope *James Webb*, prévu pour 2018, devrait leur fournir cette possibilité.

Malgré tout, *Hubble* n'a pas dit son dernier mot. Le télescope ne peut voir que jusqu'à une certaine limite de luminosité sans recourir à des temps d'exposition excessifs. Mais les « lentilles gravitationnelles » pourraient venir à la rescousse. Les objets massifs (dans ce cas, les amas de galaxies) déforment les objets situés très loin derrière – selon les lois de la relativité générale d'Albert Einstein – et parfois les grossissent. La lumière provenant d'objets lointains et peu brillants serait aussi amplifiée 10 à 20 fois.

La relativité générale au secours de Hubble

Les astrophysiciens ont donc traqué ces lentilles gravitationnelles avec le télescope *Hubble*. Dans le cadre du programme CLASH (*Cluster Lensing And Supernova Survey with Hubble*, Détection de lentilles gravitationnelles par des amas et relevé de supernovae avec *Hubble*), on a identifié



quelque 250 galaxies supplémentaires présentant des décalages vers le rouge compris entre 6 et 8, et une poignée d'autres dont le décalage pourrait aller jusqu'à 11.

Un nouveau projet nommé *Frontier Fields* pour *Hubble* va permettre aux astronomes de chercher des galaxies lointaines et peu lumineuses, situées derrière six amas particulièrement massifs. « Dans les trois années à venir », dit Jennifer Lotz, membre du projet, « nous allons regarder chaque amas pendant 140 orbites de *Hubble* environ (chaque orbite correspond à 45 minutes de temps d'observation), ce qui nous permettra de sonder l'Univers plus profondément que nous ne l'avons jamais fait. »

Un autre phénomène pourrait aider les astrophysiciens à sonder les débuts de l'Univers. Quand ils ont été découverts dans les années 1960, les sursauts gamma (de courtes salves de rayonnement à hautes fréquences qui apparaissent dans des directions aléatoires) étaient un mystère total. Aujourd'hui, les astronomes pensent que beaucoup d'entre eux apparaissent quand des étoiles massives meurent : elles s'effondrent en formant un trou noir et émettent des jets de rayonnement gamma. Quand ces jets heurtent les nuages de gaz environnants, ils déclenchent une émission secondaire de lumière visible et infrarouge si intense qu'elle peut être détectée par les télescopes classiques.

Nouvel espoir

Toutefois, la détection des sursauts n'est pas chose aisée. Elle commence avec l'Observatoire orbital *Swift* qui surveille le ciel, lance immédiatement une alerte en cas de détection d'un sursaut gamma et transmet les coordonnées du sursaut aux télescopes au sol qui effectuent les mesures de décalage vers le rouge. Le temps de réaction est crucial.

L'intensité des sursauts gamma surpasse celle de tous les autres objets cosmiques. Edo Berger, un astrophysicien de Harvard spécialiste des sursauts souligne « qu'ils sont probablement plus brillants que les galaxies d'un facteur un million, et qu'ils sont 10 à 100 fois plus brillants que les quasars juste après leur apparition ». Il n'y a pas besoin d'un long temps d'exposition pour les voir avec *Hubble*. En 2009, un télescope à Hawaï a mesuré pour un sursaut un décalage vers le rouge de 8,2, ce qui le place à 600 millions d'années après le Big Bang.

La cartographie des nuages d'hydrogène

Les radioastronomes ne sont pas en reste dans l'étude de l'âge sombre. Ils ont prévu de cartographier les nuages d'hydrogène neutre. Ceux-ci émettent des ondes radio qu'il sera possible de détecter avec des réseaux d'antennes tel le LOFAR (LOW Frequency ARray), qui comporte 50 000 antennes réparties sur cinq pays d'Europe.

Les astronomes devraient voir les nuages d'hydrogène neutre disparaître progressivement lors de la réionisation au cours du premier milliard d'années de l'histoire de l'Univers.

BIBLIOGRAPHIE

A. Loeb, L'Univers à l'âge des ténèbres, *Dossier Pour la Science*, n° 71, avril-juin 2011.

R. Barkana, The first stars in the universe and cosmic reionization, *Science*, vol. 313, pp. 931-934, 2006.

V. Bromm et R. B. Larson, The first stars, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, vol. 42, pp. 79-118, 2004.

J. Miralda-Escudé, The dark age of the Universe, *Science*, vol. 300, pp. 1904-1909, 2003.

L'éclair était si brillant qu'il aurait pu être vu à un décalage vers le rouge de 15 ou même 20, ce qui le placerait moins de 200 millions d'années après le Big Bang, non loin de l'époque où les toutes premières étoiles brillaient. En outre, ces étoiles massives peuvent probablement produire des sursauts gamma encore plus brillants quand elles meurent.

Les sursauts gamma ont un avantage. Les quasars n'apparaissent que dans les galaxies dotées d'un trou noir supermassif et seules les galaxies les plus brillantes sont visibles pour *Hubble*. Les sursauts, eux, sont tout aussi puissants dans les petites galaxies que dans les grandes.

Des sursauts difficiles à détecter

Mais ils présentent un inconvénient : 99 pour cent des jets qui produisent les sursauts gamma ne sont pas dirigés vers la Terre, ce qui nous empêche de les voir. Et parmi ceux qui restent et que détectent les satellites (un par jour environ), seule une minuscule fraction présente un décalage vers le rouge élevé. Pour recueillir un échantillon représentatif de sursauts à décalage vers le rouge extrêmement élevé, il faudrait une décennie, voire davantage. Il faudrait alors penser à un satellite qui remplacerait *Swift* et transmettrait les coordonnées des sursauts au télescope *James Webb* ou aux instruments au sol de la classe des 30 mètres qui devraient entrer en service dans la prochaine décennie.

Dans tous les cas, dès que le télescope *James Webb* et la prochaine génération de télescopes géants au sol commenceront à observer le ciel, les astronomes seront en mesure de cataloguer des objets beaucoup plus vieux et moins lumineux qu'aujourd'hui.

Quand les astrophysiciens ont détecté pour la première fois le rayonnement du fond diffus cosmologique en 1965, cela leur a donné une nouvelle méthode pour comprendre l'histoire de l'Univers de sa naissance jusqu'à aujourd'hui. Mais certaines périodes se sont révélées plus difficiles à étudier que d'autres. L'âge sombre en fait partie, mais les différents programmes d'observation des quasars, des sursauts gamma et des galaxies suggèrent que, d'ici quelques années, on comprendra mieux ce qui s'est passé à cette époque. ■

MÉMOIRE: un effet Google

Daniel Wegner et Adrian Ward

Les gens ont depuis
toujours compté les
uns sur les autres pour
mémoriser et retrouver
les informations qui leur
sont utiles.

Aujourd'hui, on s'en
remet souvent à Internet,
ce qui influe sur la
mémorisation et sur
la perception de soi.

Un couple reçoit une invitation à une soirée d'anniversaire. Grâce à une longue vie commune, les deux partenaires se partagent intuitivement les tâches.

L'un d'eux retient le type de la soirée (habillée ou décontractée), l'autre le lieu et l'heure.

Dans une certaine mesure, nous délégons tous des tâches mentales aux autres. Nous répartissons de façon automatique la responsabilité de mémoriser les nouvelles informations entre les membres du groupe social auquel nous appartenons, n'en retenant qu'une partie nous-mêmes. Quand nous échouons à retrouver un nom ou à réparer un appareil en panne, nous demandons à un proche qui est compétent.

Votre voiture fait un bruit anormal? Vous appelez Charles, un ami passionné de mécanique. Vous avez oublié qui joue dans *Casablanca*? Philippe, cinéphile averti, le saura certainement. D'innombrables connaissances sont disponibles parmi les membres d'une entité sociale, que celle-ci soit un couple ou le service de comptabilité d'une multinationale. Nous ne disposons pas juste des données stockées dans notre cerveau; nous savons aussi quelles informations trouver dans celui des autres.

Cette division du travail permet d'éviter une multiplication inutile des efforts et d'étendre les capacités mémorielles de l'ensemble du groupe. Quand on délègue à d'autres la responsabilité de certains types d'informations, on libère des ressources cognitives, que l'on utilise en partie pour accroître ses connaissances dans le domaine dont on s'occupe. Ainsi, chacun a accès à un savoir plus étendu et plus approfondi que s'il ne comptait que sur lui-même. La mémoire distribuée lie le groupe, sans lequel ses membres passeraient à côté d'informations essentielles. Séparé, notre couple d'invités à la soirée d'anniversaire serait en mauvaise posture: l'un des partenaires errerait dans les rues en smoking, tandis que l'autre arriverait à l'heure, mais en T-shirt.

Cette tendance à répartir l'information dans ce qu'on nomme un système de mémoire transactive s'est développée dans un monde d'interactions directes, où le cerveau humain était le meilleur système de stockage. Or le développement d'Internet a changé la donne. Nos travaux suggèrent que nous traitons ce réseau presque de la même façon qu'un partenaire humain de notre mémoire transactive. Nous lui livrons

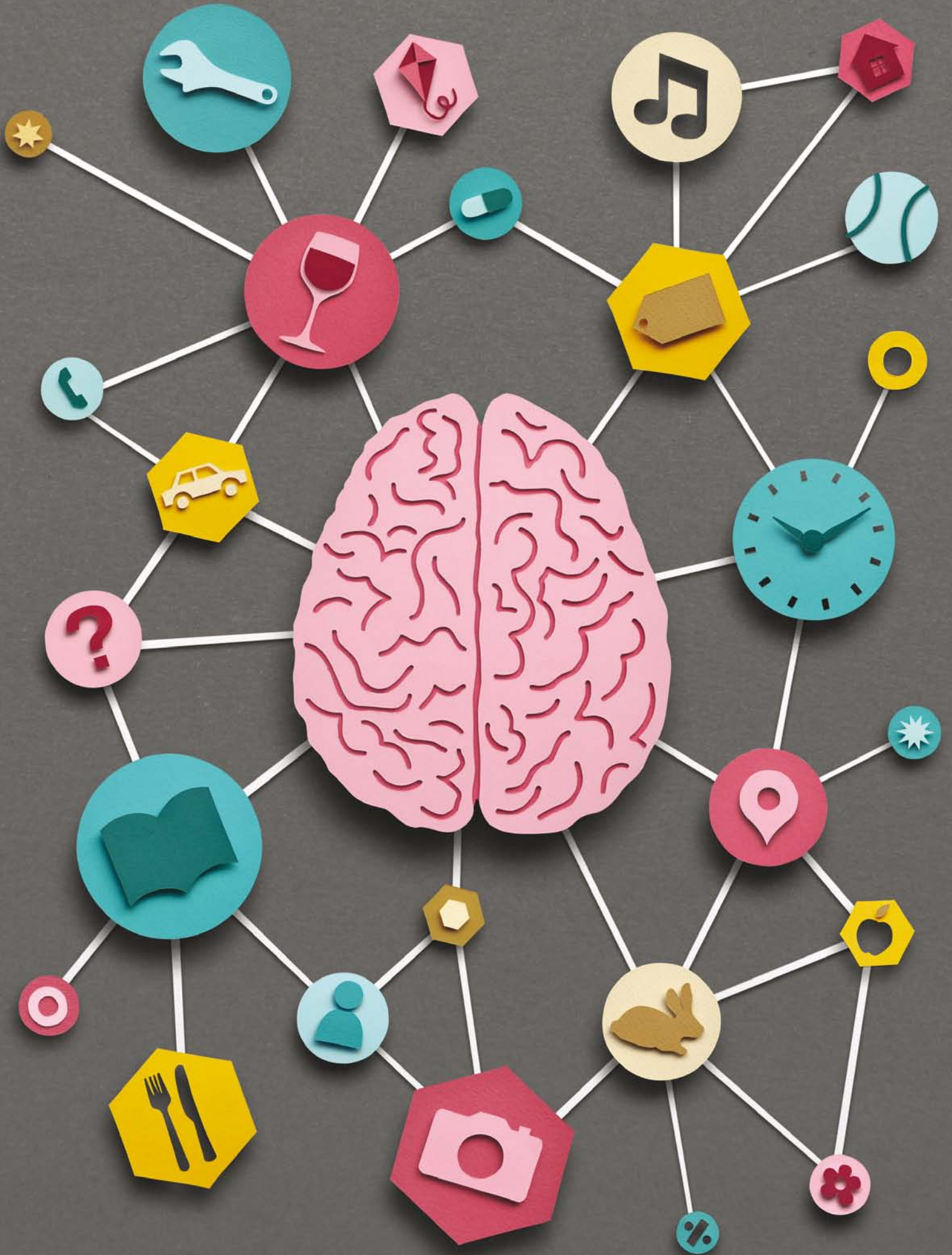
L'ESSENTIEL

■ Jadis, la mémorisation d'informations était partagée entre les membres d'un réseau social: on recourait à ses amis et ses connaissances pour savoir comment cuire un rôti ou réparer une fuite.

■ Internet a changé la donne. Désormais, il est fréquent d'effectuer une recherche rapide sur le Web plutôt que d'appeler un ami.

■ La nouvelle accessibilité des informations modifie la perception subjective de soi, car les frontières entre les souvenirs personnels et ce qui est sur le Web commencent à se brouiller.

Illustration: J. B. B. B.



nos souvenirs aussi naturellement qu'à un proche. Cependant, Internet diffère d'un partenaire humain : il en sait davantage et répond plus vite. Presque toute l'information connue y est aujourd'hui accessible grâce à une simple recherche. Internet pourrait être en train de remplacer non seulement notre réseau humain de sources externes de mémoire, mais aussi nos facultés cognitives. Ainsi, il éliminerait le besoin de partenaires avec qui partager l'information et éteindrait le réflexe de garder les faits importants en mémoire. C'est ce que nous nommons *l'effet Google*.

En 2011, une expérience a révélé à quel point l'ordinateur a déjà commencé à se substituer aux amis ou aux membres de la famille pour partager les tâches quotidiennes de mémoire. Betsy Sparrow, de l'Université Columbia, Jenny Liu, alors à l'Université du Wisconsin-Madison, et l'un d'entre nous (D. Wegner) ont demandé aux participants d'écrire sur un ordinateur 40 faits notables, tels que : « L'œil d'une autruche est plus gros que son cerveau ». Ils ont indiqué à la moitié des participants que leur travail serait sauvegardé et à l'autre moitié qu'il serait effacé. En outre, ils ont demandé à la moitié de chaque groupe de mémoriser les informations.

Les chercheurs ont ainsi constaté que ceux qui croyaient que l'ordinateur avait sauvegardé la liste de faits les restituaient beaucoup moins bien. Les participants semblaient traiter l'ordinateur comme les partenaires de mémoire transactive que nous avons commencé à étudier il

y a plusieurs décennies : ils se déchargeaient des informations sur lui plutôt que de les stocker en eux-mêmes. Cette tendance persistait même chez ceux à qui l'on avait explicitement demandé de garder

Il est parfois plus rapide d'extraire une information d'Internet que de consulter sa propre mémoire.

les informations à l'esprit. La propension à se reposer sur les ressources numériques semble si forte que les gens sont souvent incapables de mémorisation précise dès lors qu'ils sont en présence d'un « compagnon informatique ».

Dans une autre expérience, nous avons étudié à quel point le recours à Internet est un réflexe quand on essaie de répondre à une question. Pour le déterminer, nous avons utilisé ce que les psychologues nomment une tâche de Stroop : les participants examinent une série de mots écrits en diverses couleurs et doivent nommer leur couleur sans se préoccuper de leur signification.

S'ils mettent du temps à nommer la couleur, on en déduit qu'ils peinent à ignorer le sens du mot, car il se rapporte à quelque chose qui occupe leurs pensées. Ainsi si le mot *rouge* est écrit en rouge, ils nomment très vite la couleur. En revanche, ils sont plus longs à répondre si le mot *rouge* est écrit en bleu, par exemple. Ou encore, des personnes affamées sont plus lentes

à nommer la couleur d'un mot relatif à la nourriture que des personnes repues.

Dans notre expérience, les participants exécutaient deux tâches de Stroop : l'une après avoir répondu à des questions faciles de culture générale, l'autre après avoir été confrontés à des questions difficiles, auxquelles ils ne savaient pas répondre par eux-mêmes (par exemple : « Les drapeaux de tous les pays ont-ils au moins deux couleurs ? »). Les mots des tâches de Stroop étaient liés soit à Internet (tels *Google* ou *Yahoo*, écrits respectivement en rouge et en bleu), soit à des marques (*Nike* en jaune ou *Target* en vert, par exemple).

Après avoir répondu aux questions difficiles, les participants étaient notablement plus lents à donner la couleur des mots quand ces derniers étaient liés à Internet, mais pas quand ils se rattachaient à une marque quelconque. Cela suggère qu'Internet vient rapidement à l'esprit quand on ne sait pas répondre à une question. Notre première réaction semble alors de penser à lui, notre « ami » qui sait tout et à qui on peut demander n'importe quoi par une simple pression du doigt ou une commande vocale.

Cependant, en transférant à Internet la responsabilité de toutes sortes d'informations, nous remplaçons peut-être d'autres partenaires potentiels de mémoire transactive, tels des amis, des membres de la famille ou des spécialistes.

Au premier abord, cette transition d'une information répartie entre membres d'un réseau social vers une information confiée

Internet et mémoire : des effets controversés

Si Internet semble bien changer la perception de soi, comme le décrit cet article, son influence négative sur la mémoire est sujette à débat. Les auteurs se fondent sur les expériences de B. Sparrow et ses collègues, qui montreraient que l'on mémorise moins bien les faits quand on pense pouvoir les retrouver. Cependant, dans ces expériences, les faits à mémoriser sont communiqués aux participants par les chercheurs ; il faudrait aussi effectuer des tests de mémoire sur des informations obtenues par une recherche sur le Web. En outre, les différences sont de dix pour cent ou moins, ce qui est peu signifi-

catif dans le domaine de la mémoire, où divers paramètres peuvent faire varier notablement les résultats. Enfin, l'une des expériences nuance le supposé effet négatif : quand on présente une seconde fois les propositions à mémoriser aux participants en leur demandant si elles ont été déclarées sauvegardées ou effacées, ils répondent plus souvent de façon correcte pour les informations déclarées sauvegardées (66 pour cent) que pour celles qui ont été déclarées effacées (51 pour cent). Si l'information elle-même paraît être un peu moins bien retenue quand on sait qu'elle est enregistrée, son sta-

tut (sauvegardé ou non) serait donc mieux mémorisé.

Les effets négatifs d'Internet sur la mémoire semblent également contredits par une enquête récente, où nous avons étudié l'impact des loisirs numériques sur les performances scolaires et cognitives des adolescents. L'enquête portait sur un échantillon représentatif de 27 000 adolescents français de 14 ans et demi, en classe de troisième. De nombreux tests ont été pratiqués, concernant la mémoire des connaissances (dans divers domaines, tels que l'histoire et les sciences), la lecture, le raisonnement... Or les collégiens qui naviguent régulièrement sur

Internet ont une mémoire des connaissances supérieure de 25 pour cent à la moyenne. Les causes restent cependant à déterminer et pourraient être liées à la catégorie socioprofessionnelle des parents, en moyenne plus élevée chez les utilisateurs réguliers du Web.

Des études complémentaires sont donc nécessaires pour préciser les effets d'Internet sur la mémoire. Pour l'instant, en tout cas, celle-ci reste performante et n'est pas prête d'être remplacée par les ordinateurs et les téléphones intelligents.

Alain Lieury

Professeur émérite de psychologie cognitive de l'Université Rennes 2

au nuage numérique peut sembler logique. Les données dispersées sur le Web présentent des ressemblances avec le contenu du cerveau d'un ami. Internet stocke de l'information, l'extrait en réponse aux questions et interagit avec nous de façon étonnamment humaine, par exemple via l'application Siri (un logiciel de commande vocale d'Apple).

Cependant, Internet ne ressemble à aucune personne réelle : il est toujours présent et fonctionnel, et il sait presque tout. L'information accessible avec un smartphone est bien plus riche que ce que peuvent enregistrer des individus, voire des groupes entiers. Elle est constamment mise à jour et, à moins d'une panne, elle n'est pas sujette aux déformations et aux oublis qui touchent les souvenirs mémorisés par le cerveau.

L'efficacité d'Internet contraste avec les méthodes de recherche plus anciennes. Pour demander une information à des amis, il faut les contacter, espérer qu'ils aient la réponse, et attendre qu'ils rassemblent leurs souvenirs. De même, pour rechercher l'information dans un livre, on doit parfois aller à la bibliothèque et parcourir les rayonnages. Avec Google et Wikipédia, elle est disponible en un instant.

Une estime de soi modifiée

Internet perturbe la distinction entre les connaissances internes et externes. Il est parfois plus rapide d'en extraire une information que de consulter sa propre mémoire. Un téléphone renvoie un résultat de recherche si vite que cela peut brouiller la frontière entre les souvenirs personnels et les immenses gisements numériques distribués sur la Toile.

Récemment, à l'Université Harvard, nous avons étudié dans quelle mesure les gens incorporent Internet à leur sens d'eux-mêmes. Pour ce faire, nous avons conçu un questionnaire déterminant la qualité que chacun attribue à sa propre mémoire. Quelqu'un qui est d'accord avec les affirmations « Je suis intelligent » et « Je mémorise bien les choses » a ainsi une bonne estime de ses capacités cognitives.

Nous avons posé aux participants une série de questions, auxquelles ils devaient répondre avec ou sans l'assistance de Google, puis nous leur avons soumis le questionnaire. L'estime de soi cognitive était notablement plus élevée chez ceux qui venaient d'utiliser Internet. Même si les réponses étaient

LES AUTEURS



Daniel WEGNER (1948-2013) était professeur de psychologie à l'Université Harvard, à Cambridge, aux États-Unis.



Adrian WARD est postdoctorant à l'Université du Colorado, à Boulder. Il a obtenu son doctorat en 2013 à l'Université Harvard, sous la direction de D. Wegner.

BIBLIOGRAPHIE

A. Lieury et al., *Loisirs numériques et performances cognitives et scolaires : une étude chez 27 000 élèves de la 3^e des collèges*, *Bulletin de Psychologie*, à paraître, 2014.

B. Sparrow et al., *Google effects on memory : Cognitive consequences of having information at our fingertips*, *Science*, vol. 333, pp. 776-778, 2011.

D. Wegner, *Transactive memory : A contemporary analysis of the group mind*, dans *Theories of Group Behavior* (éds. B. Mullen et G. R. Goethals), Springer, 1986.

récupérées mot pour mot sur la Toile, ils avaient l'impression de les avoir obtenues grâce à leurs propres capacités mentales !

Nous avons ensuite vérifié que le surcroît d'intelligence ressenti par les utilisateurs de Google ne provenait pas juste du fait qu'ils avaient répondu à davantage de questions. Pour ce faire, nous avons répété l'étude en indiquant de façon mensongère aux participants dépourvus du moteur de recherche qu'ils avaient trouvé la bonne réponse à presque toutes les questions. Même quand les membres des deux groupes croyaient avoir réussi de façon égale, ceux qui s'étaient servis d'Internet se déclaraient plus intelligents.

Ces résultats suggèrent que le renforcement de l'estime de soi cognitive ne résulte pas juste de la rétroaction positive immédiate (« J'ai fourni les bonnes réponses »). Google donne à ses utilisateurs le sentiment qu'il fait partie de leur propre boîte à outils cognitive. Les participants à l'étude percevaient un résultat de recherche comme une information non pas tirée d'Internet, mais extraite de leur mémoire. Ainsi, ils s'attribuaient le mérite d'une connaissance qui n'était que le produit d'un algorithme de recherche de Google.

L'impact psychologique de ce nouveau fonctionnement de la mémoire, à cheval entre Google et le cerveau, ne manque pas d'ironie : l'ère de l'information semble avoir créé des individus qui ont l'impression d'avoir plus de connaissances que quiconque auparavant, alors qu'ils en savent de moins en moins sur le monde qui les entoure, comme le révèle leur dépendance vis-à-vis d'Internet.

En nous libérant de la nécessité de mémoriser les faits, nous pourrions sans doute consacrer le supplément de ressources mentales disponibles à d'autres tâches. Nous développerons peut-être une nouvelle forme d'intelligence, qui ne serait plus ancrée dans les mémoires locales, hébergées par chaque cerveau. Elle pourrait réunir la créativité de l'esprit humain et l'étendue des connaissances d'Internet.

À mesure que les progrès de l'informatique brouilleront les frontières entre l'esprit et la machine, nous dépasserons sans doute certaines limites de la mémoire et de la pensée. Cela ne signifie pas que nous perdrons notre identité. Nous sommes juste en train de former un nouveau partenariat transactif, qui ne se limite plus à d'autres humains, mais inclut une source d'information plus puissante que le monde ait jamais connu.

Les notes de Ramanujan

un trésor inépuisé

Ariel Bleicher

Au début du XX^e siècle, le prodige indien Srinivasa Ramanujan a couvert plusieurs carnets de résultats mathématiques étonnants. Les mathématiciens s'en inspirent encore pour faire de nouvelles découvertes.

Un samedi matin de 1984, alors que Ken Ono est encore lycéen, il ouvre la boîte aux lettres familiale à Baltimore, aux États-Unis, et y trouve une enveloppe fine comme du papier de riz et couverte de timbres colorés. Elle est destinée à son père, un mathématicien japonais peu expansif. Quand K. Ono lui tend ce courrier, son père lève les yeux du bloc-notes jaune sur lequel il est occupé à griffonner des équations et pose son stylo. Délicatement, il décachette l'enveloppe et déplie la lettre qu'elle contient.

« Cher Monsieur », commence-t-elle, « J'ai appris [...] que vous avez contribué à la sculpture en mémoire de feu mon mari [...]. J'en suis heureuse. » Et elle est signée « S. Janaki Amal », que l'en-tête à l'encre rouge identifie comme la veuve de « (Feu) Srinivasa Ramanujan (Génie Mathématique) ».

C'est la première fois que le jeune K. Ono entend parler de Ramanujan. Autodidacte indien, le prodige mathématique Ramanujan a énoncé il y a presque un siècle des propriétés qui « semblaient à peine

L'ESSENTIEL

■ **L'autodidacte indien**
Srinivasa Ramanujan avait noté plus de 3 000 formules et propriétés liées à la théorie des nombres. Beaucoup se sont révélées exactes et ont inspiré les générations suivantes de chercheurs.

■ **Ken Ono et d'autres**
mathématiciens ont récemment découvert dans certaines des notes de Ramanujan d'autres idées fécondes.

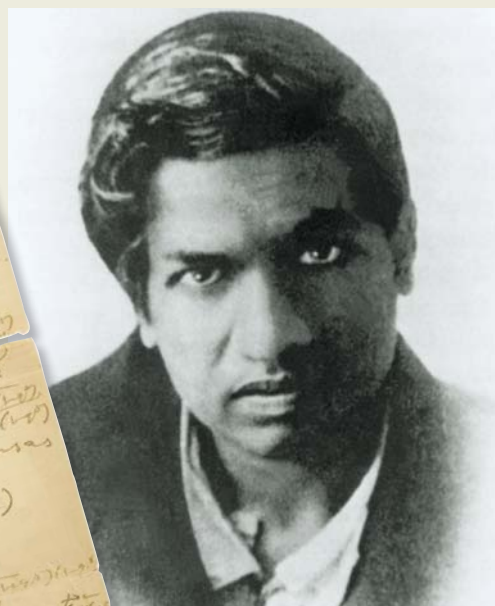
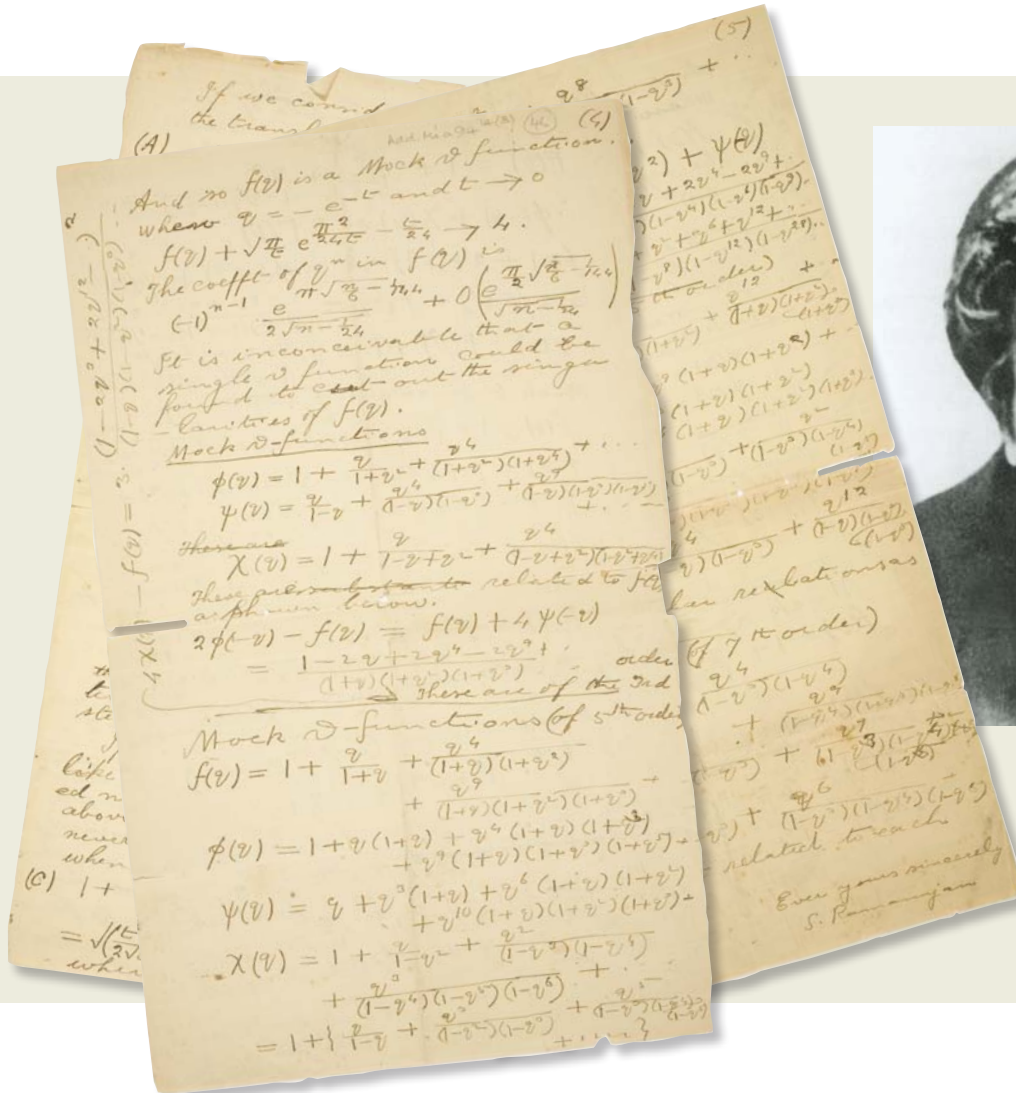
■ **Ces travaux de**
mathématiques pures pourraient aussi servir dans d'autres domaines, tels que la cryptographie.

Pages 52-53 : Carnet de Ken Ono, Université de Cambridge. Photo de Ramanujan : Science Source

croyables », comme l'écrivait son collègue britannique Godfrey Harold Hardy. Pourtant, ses travaux ont inspiré des domaines entièrement nouveaux des mathématiques et des théories qui, dans plusieurs cas, ont valu à leurs concepteurs la médaille Fields, l'équivalent pour les mathématiques du prix Nobel.

Pendant ses études de mathématiques, K. Ono, aujourd'hui professeur de théorie des nombres à l'Université Emory, en Géorgie, n'a jamais eu de raison de prêter particulièrement attention à Ramanujan. À sa connaissance, le « Génie Mathématique » n'avait laissé derrière lui aucune intuition nouvelle en rapport avec sa spécialité en théorie des nombres, les « formes modulaires », des objets abstraits quadridimensionnels dotés de remarquables propriétés de symétrie (voir l'encadré page 53).

Ramanujan fit toutefois une réapparition spectaculaire dans la vie de K. Ono en 1998, quand il avait 29 ans. Alors qu'il rassemblait les travaux du prodige pour en présenter une anthologie, Bruce Berndt, mathématicien de l'Université de l'Illinois



1. AVANT DE MOURIR,
Ramanujan (1887-1920) avait
rempli plusieurs carnets de plus
de 3 000 propositions,
souvent profondes, portant
sur la théorie des nombres.
Les mathématiciens découvrent
encore aujourd'hui dans ses notes
des idées intéressantes.

à Urbana-Champaign, a mis la main sur un manuscrit passé plutôt inaperçu. Comme le texte traitait des formes modulaires, B. Berndt le scanna et l'envoya par courrier électronique à K. Ono, pensant qu'il parviendrait peut-être à déchiffrer certains énoncés étranges.

Parvenu aux deux tiers du manuscrit, K. Ono s'arrêta. De son écriture d'écolier soigneux, Ramanujan avait inscrit six énoncés mathématiques qui semblaient très bizarres à K. Ono, alors qu'ils touchaient à sa spécialité. Pour K. Ono, ces propositions étaient sûrement fausses. «Je les ai regardées et je me suis dit : "Impossible. C'est n'importe quoi." » Sa première réaction fut de tenter de prouver que Ramanujan avait tort.

Nul ne sait comment Ramanujan est parvenu à tous les résultats qu'il a consignés. Il s'est instruit tout seul en utilisant un manuel anglais dépassé et, vers l'âge de 25 ans, tout en travaillant comme employé du gouvernement, il a commencé à faire part de ses idées dans des lettres adressées à des mathématiciens anglais. Il reçut une

seule réponse positive. Elle provenait de Hardy, alors jeune professeur à l'avenir prometteur, qui l'invita à venir travailler avec lui à Cambridge. Après deux ans seulement passés à l'étranger, Ramanujan tomba malade, à la suite des pénuries de nourriture de la Première Guerre mondiale. Amaigri et fiévreux, il rentra en Inde où il mourut en 1920. Il n'avait que 32 ans.

Une mine d'idées en héritage

Outre 37 articles publiés, Ramanujan a laissé derrière lui des lettres, des manuscrits partiellement achevés et trois carnets de notes reliés de cuir. En les examinant, Hardy et d'autres mathématiciens ont trouvé qu'il avait redécouvert des théorèmes classiques de la théorie des nombres, initialement démontrés par des sommités des mathématiques. Ramanujan avait en outre noté d'autres propriétés que personne n'avait vues. Un mathématicien de métier aurait le réflexe d'étayer chaque affirmation par une démonstration. Mais Ramanujan

ne s'en donnait pas la peine. Il remplissait page après page de longues listes de théorèmes et de calculs qu'il traitait de tête ou sur une ardoise, et notait rarement comment il avait obtenu ses résultats. Les trois carnets contiennent à eux seuls plus de 3 000 énoncés de ce type et, depuis la mort de Ramanujan, les mathématiciens ont investi beaucoup d'efforts pour les confirmer ou les infirmer.

B. Berndt avait commencé à creuser les archives de Ramanujan dans les années 1970. Il n'avait pas encore fini plus de deux décennies après, quand il mit la main sur le manuscrit contenant les six propositions bizarres que K. Ono était bien décidé à réfuter. Ces énoncés dressent un parallèle entre les formes modulaires et les nombres de partitions des entiers. Ces nombres constituent une suite d'entiers dénombrant toutes les façons d'additionner des entiers plus petits pour obtenir celui de départ. Les nombres de partitions des entiers sont donnés par la fonction $p(n)$, qui compte les combinaisons d'entiers positifs dont la somme est

égale à un entier n donné. Par exemple, $p(4)$ est égal à 5, car on a cinq combinaisons donnant le nombre 4 : $1 + 1 + 1 + 1$, $1 + 1 + 2$, $2 + 2$, $1 + 3$ et 4.

La fonction $p(n)$ et les nombres qu'elle produit ne constituent un problème simple qu'en apparence. Des siècles durant, les mathématiciens ont peiné pour trouver parmi ces nombres des motifs qui permettraient de les prédire, de les calculer ou de les relier à d'autres fonctions et théorèmes. Et c'est Ramanujan qui fit la première percée significative. Avec Hardy, il mit au point une méthode pour trouver rapidement une valeur approximative des nombres de partitions des entiers. Afin de vérifier l'exactitude de leurs approximations, ils firent appel à Percy Alexander MacMahon, commandant dans l'artillerie britannique à la retraite et as du calcul, pour déterminer à la main les 200 premiers nombres de partitions (les valeurs de $p(n)$ pour n allant de 1 à 200).

Partitions des entiers : des propriétés cachées

Les approximations de Ramanujan et Hardy se révélèrent remarquablement précises. Plus important, l'étude de la liste de MacMahon a conduit Ramanujan à l'une de ses observations les plus célèbres. MacMahon avait disposé les valeurs de $p(n)$, en commençant par la convention $p(0) = 1$, en cinq colonnes. Ramanujan remarqua que toutes les entrées de la dernière colonne – c'est-à-dire tous les cinq nombres de partitions en commençant par $p(4)$ – sont divisibles par 5, et il prouva que cette propriété est valable pour tout le reste de la suite des nombres de partitions (voir la figure 2). Autrement dit, $p(5k - 1)$ est divisible par 5 pour tout entier positif k . C'était stupéfiant : les partitions concernent des additions de nombres, et personne n'imaginait qu'elles pouvaient avoir des propriétés faisant intervenir la division.

Ramanujan repéra d'autres motifs similaires. Il prouva ainsi que tous les sept nombres de partitions des entiers, en commençant par $p(5)$, on a un multiple de 7 (c'est-à-dire que $p(7k - 2)$ est divisible par 7 pour tout entier positif k). De même, tous les 11 nombres de partitions à partir de $p(6)$, on a un multiple de 11 : $p(11k - 5)$ est divisible par 11 pour tout entier positif k . Mystérieusement, les « congruences de Ramanujan » s'arrêtaient

1	1	2	3	5
7	11	15	22	30
42	56	77	101	135
176	231	297	385	490
627	792	1002	1255	1575

2. LE NOMBRE DE PARTITIONS d'un entier n est le nombre $p(n)$ de façons dont il peut s'écrire comme une somme d'entiers positifs. Ramanujan a remarqué que tous les cinq nombres dans la suite $p(n)$, on a un multiple de 5 (colonne de droite), et il a prouvé que cette propriété se répète à l'infini.

L'AUTEUR



Ariel BLEICHER est journaliste scientifique indépendante à New York. Elle a notamment

fait partie de la rédaction de la revue de technologie IEEE Spectrum.

BIBLIOGRAPHIE

M. J. Griffin et al., A framework of Rogers-Ramanujan identities and their arithmetic properties, prépublication, 2014 (<http://arxiv.org/abs/1401.7718>).

M. J. Griffin et al., Ramanujan's mock theta functions, *Proc. of the Nat. Acad. of Sci. USA*, vol. 110(15), pp. 5765-5768, 2013.

A. Folsom et al., l -adic properties of the partition function, *Advances in Mathematics*, vol. 229(3), pp. 1586-1609, 2012.

J. Borwein et P. Borwein, Srinivasa Ramanujan, dans *Les mathématiciens*, Belin-Pour la Science, pp. 262-275, 2010.

là. « Il semble qu'il n'y ait pas de propriétés aussi simples pour des modules impliquant des nombres premiers autres que ceux-ci », écrivit Ramanujan dans un article de 1919, en se référant aux nombres premiers 5, 7 et 11.

Après sa mort, des mathématiciens ont cherché à savoir si les partitions des entiers présentaient des propriétés moins simples. Mais à la fin des années 1990, il n'avaient pas mis au jour plus d'une poignée de congruences supplémentaires faisant intervenir certains nombres premiers et puissances de nombres premiers, sans régularité apparente (dont 29, 17^3 et 23^6). Ils ont commencé à suspecter que de tels motifs étaient imprévisibles et extrêmement rares.

Mais quand K. Ono lut les six propositions évoquées plus haut, il comprit qu'elles pourraient contredire cette impression. Les mathématiciens pensaient depuis longtemps que les nombres de partitions des entiers sont seulement reliés à un sous-ensemble de formes modulaires avec lesquelles il est difficile de travailler. Or les six propositions de Ramanujan relient les deux domaines d'une façon profonde que nul n'avait anticipé.

Les formules étaient correctes à chaque fois

Comme Ramanujan ne consignait pas ses démonstrations, K. Ono ne put identifier directement ses erreurs de raisonnement. Il décida donc de tester, avec divers nombres, les formules avancées par Ramanujan. Or ces formules étaient correctes à chaque fois. K. Ono se rendit compte que Ramanujan devait avoir raison « parce que l'on ne peut pas être assez créatif pour inventer quelque chose de ce genre et que ce soit vrai 100 fois, à moins de savoir pourquoi cette formule est vraie, toujours ». Il ferma alors les yeux et réfléchit intensément : qu'avait donc compris Ramanujan et qui a échappé à tous les autres ?

K. Ono savait que les formes modulaires sont « parsemées de congruences » – ces propriétés de divisibilité dont Ramanujan avait trouvé quelques exemples parmi les nombres de partitions des entiers. En réfléchissant aux six propositions, l'idée vint à l'esprit de K. Ono que s'il envisageait la fonction $p(n)$ comme une forme modulaire déguisée, il pourrait montrer qu'elles sont vraies.

Une autre idée suivit dans la foulée : il s'aperçut qu'avec quelques ajustements, les théories qu'il avait développées sur les formes modulaires pouvaient être de puissants outils non seulement pour vérifier les énoncés de Ramanujan, mais aussi pour mettre au jour des propriétés plus profondes de la fonction $p(n)$.

Multiples congruences...

K. Ono parvint ainsi à prouver que les congruences des nombres de partitions des entiers ne sont pas rares du tout. Les mathématiciens avaient supposé qu'il y en avait peu au-delà de 5, 7 et 11. En fait, comme le découvrit K. Ono, il en existe une infinité.

Les collègues de K. Ono saluèrent cette découverte, mais cela ne lui suffit pas pour

être satisfait. Il avait beau avoir prouvé que les congruences des nombres de partitions des entiers sont partout, il n'était pas en mesure de déterminer où précisément.

Quand K. Ono bute sur un problème, il le met de côté avec d'autres problèmes non résolus jusqu'à ce qu'il refasse naturellement surface. Le problème de la prédiction des congruences des nombres de partitions resta ainsi en sommeil pendant cinq ans, jusqu'à l'arrivée du postdoctorant Zachary Kent à l'Université Emory, au printemps de 2010. Il surgit alors un jour au hasard d'une conversation, et bientôt ils ne parlèrent plus que de cela – dans leurs bureaux, à la pause café et lors de longues promenades dans les bois au Nord d'Atlanta.

Petit à petit, ils ont mentalement construit une superstructure labyrinthique où les nombres de partitions peuvent être

parfaitement rangés. Pour ce faire, ils ont fait appel à des méthodes p -adiques, où l'on considère les objets arithmétiques à des multiples près des puissances successives d'un nombre premier p (par exemple 13, 13^2 , 13^3 et ainsi de suite). Or les nombres ainsi obtenus obéissent à une structure fractale : ils se répètent selon des motifs presque identiques à différentes échelles, comme les branches successives d'un cristal de glace. Ce résultat montre que les nombres de partitions des entiers ne sont pas simplement une séquence aléatoire de nombres avec des symétries fortuites ici ou là. Au contraire, ces nombres ont « une structure interne d'une grande beauté », explique K. Ono, qui les rend prévisibles et bien plus fascinants à étudier.

Il fallut plusieurs mois à K. Ono, Z. Kent et leur collaboratrice Amanda Folsom de

Formes modulaires et fonctions thêta

Les formes modulaires et les fonctions thêta sont des fonctions de variables complexes vérifiant certaines relations fonctionnelles ; elles incarnent de multiples phénomènes liés à la géométrie algébrique, l'arithmétique et la théorie des groupes.

Plusieurs des grands noms

des mathématiques du XIX^e siècle leur sont associés : Gotthold Eisenstein, Carl Gustav Jacobi, Henri Poincaré, Bernhard Riemann... De nos jours, ces fonctions et leurs généralisations interviennent dans la théorie des représentations des groupes, des courbes elliptiques et des variétés abéliennes, domaines importants des mathématiques du XX^e siècle.

Notons $\sum_{n \geq 0}$ l'opération de somme sur tous les entiers n positifs ou nuls. Une forme modulaire en la variable complexe z peut être vue comme une série infinie $f(z) = \sum_{n \geq 0} a_n q^n$ où $q = e^{2\pi i z}$, convergente quand la partie imaginaire de z est strictement positive (donc pour $|q| < 1$), et qui, principalement, obéit à l'équation fonctionnelle :

$$f\left(\frac{az+b}{cz+d}\right) = (cz+d)^k f(z),$$

pour des entiers a, b, c, d vérifiant $ad - bc = 1$ et des propriétés de congruence telles que, par exemple, « N divise c ». L'entier N est le « niveau » et k est le « poids » de la forme modulaire. Les formes modulaires de poids 2 ont joué un rôle fondamental dans la preuve par Andrew Wiles du grand théorème de Fermat, en 1994 (théorème selon lequel il n'existe pas d'entiers positifs x, y et z tels que $x^n + y^n = z^n$, dès que l'entier n est supérieur à 2).

Le lien des formes modulaires avec les courbes elliptiques peut être illustré avec l'exemple de la courbe $y^2 - y = x^3 - x$.

Pour tout nombre premier p , notons N_p le nombre de solutions de cette équation modulo p (c'est-à-dire à un multiple de p près) et posons :

$a(p) = p - N_p$.
Étendons la suite des $a(p)$ à tous les entiers positifs

(premiers ou non) par les règles $a(p^m) - a(p)a(p^{m-1}) + pa(p^{m-2}) = 0$ et $a(nm) = a(n)a(m)$ pour n et m premiers entre eux. Alors d'après un cas particulier du théorème de A. Wiles, la fonction $f = \sum a(n)q^n$ est une forme modulaire de poids 2 et de niveau 37.

Quant aux fonctions thêta, la fonction typique est la fonction de deux variables suivante :

$$\theta(u, z) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} q^{n^2} t^n$$



REPRÉSENTATION DE LA partie réelle d'une fonction modulaire liée aux « fonctions elliptiques de Weierstrass », sur le disque $|q| < 1$ (nombres complexes q dont le module est inférieur à 1). Les régions où la partie réelle de la fonction est nulle sont en noir (les valeurs sont croissantes du bleu-vert au jaune-rouge).

avec $q = e^{2\pi i z}$ et $t = e^{2\pi i u}$ et où $\sum_{n \in \mathbb{Z}}$ désigne la somme sur tous les entiers relatifs n (négatifs et positifs).

En tant que fonction de u , la fonction θ vérifie : $\theta(u + az + b) = e(z, u) \theta(u, z)$, où $e(z, u)$ est un facteur non nul ayant une expression simple.

En prenant $u = 0$, la fonction $\theta_0(z) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} q^{n^2}$ est une forme modulaire « tordue » de poids 1/2 ; elle vérifie notamment :

$$\theta_0(-1/z) = \alpha z^{1/2} \theta_0(z)$$

où $\alpha = e^{-i\pi/4}$.

Les fonctions thêta recèlent

une foule d'informations arithmétiques. On a par exemple remarqué que $\theta_0^4(z) = 1 + \sum_{n > 1} r(n)q^n$ où $r(n)$ est le nombre de représentations de l'entier n comme somme de quatre carrés d'entiers ; cela a permis à Jacobi de démontrer que $r(n)$ est égal à huit fois la somme des diviseurs de n si n est impair, et à 24 fois la somme des diviseurs impairs de n si n est pair.

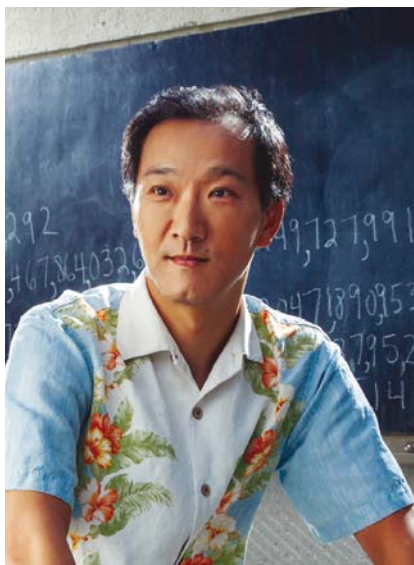
- Marc Hindry
Institut de mathématiques
de Jussieu - Paris Rive Gauche

l'Université Yale pour démêler tous les fils de leur nouvelle théorie. Mais ils réussirent à prouver que les congruences des nombres de partitions apparaissent de façon calculable. Il en existe pour tous les nombres premiers et leurs puissances. Mais au-delà de 11, les motifs deviennent beaucoup plus complexes, ce qui explique probablement pourquoi Ramanujan ne les a jamais déterminées. K. Ono et ses collègues présentèrent leurs résultats à un symposium spécialement organisé à l'Université Emory en 2011.

De puissants outils

L'exploration des intuitions de Ramanujan a conduit K. Ono à d'autres développements qui pourraient un jour trouver une utilité hors des mathématiques. En mêlant la préscience de Ramanujan avec les mathématiques actuelles, K. Ono et ses collègues ont mis au point de puissants outils de calcul, utiles en mathématiques pures, mais qui pourraient aussi déboucher sur de meilleures méthodes de cryptage des données informatiques et aider à étudier les trous noirs.

En collaboration avec Jan Bruinier, de l'Université technique de Darmstadt en



3. LES TRAVAUX DE KEN ONO, mathématicien à l'Université Emory, à Atlanta aux États-Unis, confirment et généralisent certains des résultats figurant dans les notes de Ramanujan.

Alllemagne, K. Ono a établi une formule permettant de calculer rapidement et avec précision les nombres de partitions des grands entiers, le graal que Ramanujan n'avait jamais atteint. K. Ono surnomme sa formule « l'Oracle ». En plus de calculer les nombres de partitions, dit-il, elle pourrait servir à étudier certains types de « courbes elliptiques » – des objets géométriques définis par une certaine classe d'équations polynomiales et qui sont dotées de remarquables propriétés arithmétiques.

Les cryptographes utilisent les courbes elliptiques pour réaliser certains algorithmes de cryptage. Le succès d'un tel algorithme repose sur la capacité de ce dernier à engendrer, pour qui veut décrypter le message codé, un problème mathématique impossible à résoudre en un temps raisonnable. Par exemple, un algorithme de cryptage répandu nommé RSA repose sur la difficulté à décomposer un très grand nombre en ses facteurs premiers. Des méthodes plus récentes font appel à des points sur une courbe elliptique, dont les relations sont encore plus difficiles à déchiffrer. Si l'Oracle ou les découvertes associées peuvent éclairer d'autres propriétés plus insaisissables, les cryptographes pourraient potentiellement les exploiter pour concevoir des systèmes de cryptage plus robustes.

Les travaux de K. Ono ont également dévoilé l'un des plus grands mystères de l'héritage mathématique de Ramanujan. Trois mois avant de mourir, cloué au lit par la fièvre et la douleur, le mathématicien indien écrivit à la hâte une dernière missive à Hardy. « Je suis tout à fait désolé de ne pas t'avoir écrit une seule lettre jusqu'à maintenant », s'excusait-il. « J'ai récemment découvert des fonctions très intéressantes que j'appelle "fausses" fonctions thêta [...]. Elles s'inscrivent dans les mathématiques aussi élégamment que les fonctions thêta ordinaires ».

Les fonctions thêta sont essentiellement des formes modulaires (voir l'encadré page 53). Ramanujan supposait qu'il est possible de décrire de nouvelles fonctions (les fausses fonctions thêta, ou fonctions mock-thêta, le terme anglais *mock* signifiant faux) qui ne ressemblent en rien à des formes modulaires et qui pourtant se comportent de la même façon en des points particuliers nommés singularités. À l'approche de ces points, la valeur prise par

Généraliser les identités de Rogers-Ramanujan

La lettre adressée par Ramanujan à G. H. Hardy en 1913 incluait deux identités, initialement découvertes en 1894 par le mathématicien britannique Leonard James Rogers, et désormais connues sous le nom d'identités de Rogers-Ramanujan. Elles portent sur deux séries infinies, notées $G(q)$ et $H(q)$, et les identifient à des produits infinis :

$$G(q) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{q^{n^2}}{(1-q) \dots (1-q^n)} = \prod_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(1-q^{5n+1})(1-q^{5n+4})}$$

$$H(q) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{q^{n^2+n}}{(1-q) \dots (1-q^n)} = \prod_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(1-q^{5n+2})(1-q^{5n+3})}$$

Ces identités sont utilisées aujourd'hui dans plusieurs domaines des mathématiques et de la physique théorique. La lettre de Ramanujan contenait une troisième formule montrant que leur quotient $H(q)/G(q)$ a des

propriétés remarquables. Notamment, selon les valeurs de q , ce quotient donne aisément des nombres algébriques (nombres qui sont solution d'une équation polynomiale à coefficients entiers, comme le nombre

d'or $(1 + \sqrt{5})/2$, qui est la solution positive de l'équation $x^2 - x - 1 = 0$).

Ces formules de Ramanujan ont longtemps intrigué les mathématiciens, qui s'interrogeaient sur leur origine et les raisons profondes de leur validité. Tout récemment, Ole Warnaar, de l'Université du Queensland en Australie, en collaboration avec K. Ono et Michael Griffin de l'Université Emory, ont découvert que ces identités constituent des cas particuliers d'une famille infinie d'identités de nature et de propriétés similaires, ce qui permet d'intégrer les identités de Rogers-Ramanujan dans un cadre théorique plus vaste.

une fonction croît jusqu'à l'infini. Considérons par exemple la fonction $f(x) = 1/x$, qui présente une singularité en $x = 0$. À mesure que la variable x se rapproche de 0, la valeur de $f(x)$ devient infiniment grande. Les formes modulaires ont un nombre infini de singularités. Ramanujan a eu l'intuition que pour chacune de ces fonctions, il existe une fausse fonction thêta associée qui non seulement a les mêmes singularités, mais aussi tend vers l'infini presque de la même façon en ces points.

C'est seulement en 2002 qu'un mathématicien hollandais, Sander Zwegers, a formellement défini les fausses fonctions thêta, en utilisant des idées formulées des décennies après la mort de Ramanujan. Mais les mathématiciens ne parvenaient toujours pas à expliquer l'affirmation de Ramanujan selon laquelle ces fonctions imitent les formes modulaires au niveau de leurs singularités.

La machinerie sous-jacente à l'Oracle de K. Ono et J. Bruinier allait finalement résoudre l'énigme. Avec A. Folsom et Robert Rhoades, de l'Université Stanford, K. Ono

l'a utilisée afin de dériver des formules permettant de calculer les valeurs des fausses fonctions thêta au voisinage des singularités. Et effectivement, ils ont trouvé que la conjecture de Ramanujan est correcte : à proximité des singularités, les fausses fonctions thêta ressemblent étonnamment aux formes modulaires. Dans un cas, par exemple, les mathématiciens trouvent que la différence entre les valeurs des deux

KEN ONO ET SES COLLÈGUES

ont trouvé que la conjecture de Ramanujan est correcte : à proximité des singularités, les fausses fonctions thêta ressemblent étonnamment aux formes modulaires.

fonctions se rapproche fortement de 4 quand on tend vers la singularité, ce qui est presque négligeable dans cet univers de nombres infinis.

Les physiciens ont récemment commencé à utiliser les fausses fonctions thêta pour étudier l'entropie des trous noirs, l'entropie étant une grandeur de nature thermodynamique qui mesure le désordre d'un système ou la quantité d'information

qu'il représente. Certains scientifiques pensent que des formules apparentées à celles de K. Ono leur permettront peut-être de sonder ces phénomènes avec une meilleure précision.

K. Ono se rappelle encore le plaisir enivrant qu'il ressentit en voyant pour la première fois les congruences de Ramanujan, tandis que son père en traçait de son écriture régulière les symboles étranges sur son bloc-notes jaune. « Pour quoi seulement trois ? », avait-il demandé. « Personne ne le sait », lui avait répondu son père.

En racontant cette histoire, K. Ono est assis dans la salle à manger de son domicile, en Géorgie. Le mur derrière lui porte une photographie du buste en bronze de Ramanujan qui a été commissionné pour sa veuve grâce à des dons de 25 dollars, de son père et de centaines d'autres mathématiciens et scientifiques du monde entier. « Jamais dans mes rêves les plus fous je n'aurais imaginé être en situation de dire un jour : "Tu sais quoi, Papa ? Ces congruences ne sont pas les seules – loin de là." » ■

Pour contribuer à la transmission de la culture mathématique, LE MAGAZINE TANGENTE ORGANISE

LES TROPHÉES tangente

DÉPÔT DES CANDIDATURES AVANT LE 31 AOÛT 2014 MINUIT

Prix Bernard-Novelli

Soutenir les jeunes créateurs

Vous êtes collégiens, lycéens ?

Vous aimez concevoir des jeux logiques faisant intervenir les mathématiques ?

Participez à ce concours et transformez votre projet en un produit mobile disponible sur l'App Store et Google Play



Prix Tangente du livre

Donner envie d'en savoir plus

A partir du 15 juin, participez à la sélection des ouvrages en votant sur : www.tropheestangente.com

Prix Tangente du meilleur article

Raconter les mathématiques

Envoyez-nous un article inédit vulgarisant un concept mathématique. Le meilleur sera publié au sein du magazine Tangente

POUR LA SCIENCE

Inscription, informations et modalités de participation sur le site www.tropheestangente.com

Le principe d'équivalence à l'épreuve quantique

Domenico Giulini

L'égalité entre la masse qui mesure l'inertie et la masse qui détermine la gravitation est au fondement de la relativité générale d'Einstein. Une expérience récente censée la tester sur des objets quantiques divise les spécialistes.

Dans le vide, une plume et une boule de pétanque tombent de la même façon et aussi vite... du moins en apparence, c'est-à-dire dans la limite des incertitudes de mesure. Pour valider expérimentalement le principe de la chute identique de corps différents, encore faut-il disposer d'une théorie dont les hypothèses fondamentales sont formulées de façon claire et complète, et reliées par des chaînes logiques à des prédictions testables.

Il n'est pas sûr que ce soit le cas. Les deux grands pans de la physique fondamentale que sont la théorie de la relativité générale d'Einstein et la théorie quantique soulèvent des problèmes d'interprétation quand on tente de tester la première à l'aide d'une expérience faisant intervenir la seconde. Une telle difficulté est apparue lorsque des physiciens ont testé le « principe d'équivalence », un fondement de la relativité générale, au moyen d'une expérience mettant en jeu la théorie quantique. Nous verrons qu'elle oppose l'équipe de Claude Cohen-Tannoudji, en France, et celle de Steven Chu, aux États-Unis, deux colaurés du prix Nobel de physique de 1997.

Plusieurs théories physiques actuelles passent pour fondamentales. Cela signifie que chacune décrit une grande gamme de phénomènes dans les limites de la précision de mesure ; qu'elle est applicable de façon universelle ; qu'elle ne se contredit pas dans ses conséquences. La relativité générale et la théorie quantique sont de telles théories, et elles ont résisté jusqu'ici à tous les tests expérimentaux.

Les grandes constantes fondamentales

Des constantes dites fondamentales leur sont attachées. Il s'agit de la vitesse de la lumière c et de la constante gravitationnelle G dans le cas de la relativité générale, et de la constante de Planck h dans le cas de la théorie quantique. La dimension (au sens physique de la longueur, de la masse, du temps) de la vitesse de la lumière est une longueur divisée par un temps. Celle de la constante gravitationnelle est plus compliquée et découle de la loi d'attraction universelle de Newton ($F = Gmm'/r^2$). Quant à la constante de Planck h , elle a la dimension d'une action – c'est-à-dire du

produit d'une énergie par un temps – et pour cette raison, on la nomme aussi le quantum d'action.

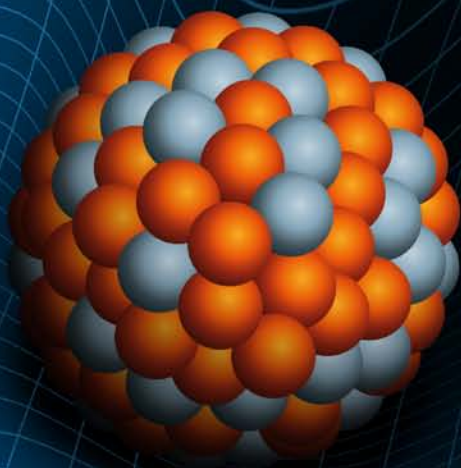
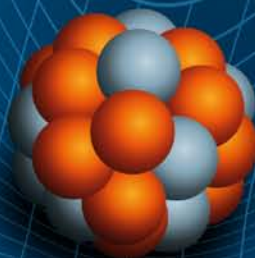
Du point de vue de leur dimension, ces trois constantes fondamentales combinent des unités de longueur, de temps ou de masse. Inversement, on peut les combiner pour former un système d'unités – les « unités de Planck » : la longueur de Planck, la masse de Planck, le temps de Planck (voir l'encadré page 59). Ces unités indiquent, grossièrement, à quelles échelles d'espace-temps et de masse (ou d'énergie) la théorie quantique et celle de la relativité générale devraient se rejoindre. Dans ces situations, les phénomènes physiques sont censés ne plus pouvoir être décrits que dans le cadre d'une théorie quantique de la gravitation, dont la mise au point se fait attendre.

D'ordinaire, les effets gravitationnels et les effets quantiques se manifestent à des échelles très différentes, de sorte que les mesurer simultanément exige des précisions énormes. Les échelles indiquées par les unités de Planck sont si petites qu'il semble exclu de pouvoir s'en approcher expérimentalement. Ainsi, il y a autant d'ordres de grandeur (des puissances de 10) entre

1. L'ESPACE-TEMPS QUADRIDIMENSIONNEL

de la relativité générale d'Einstein est comparable, en trois dimensions [deux d'espace, une de temps], à un tissu élastique que des masses courbent, façonnant ainsi l'espace où évoluent les masses voisines.

Mais les lois de la relativité générale s'appliquent-elles encore à l'échelle des atomes (*ici des noyaux atomiques*) ?



L'ESSENTIEL

■ Le principe d'équivalence,

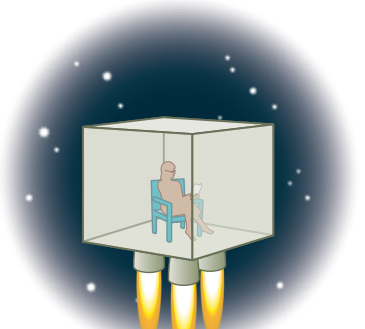
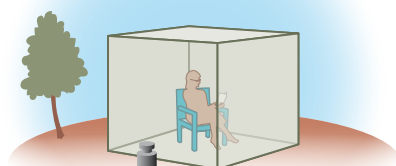
l'un des fondements de la théorie de la relativité générale, stipule que la masse gravitationnelle et la masse inertielle sont identiques.

■ Des physiciens ont entrepris de tester la validité de ce principe sur des atomes, donc à l'échelle d'un système quantique.

■ Ces travaux soulèvent de délicates questions d'interprétation, mais pourraient éclairer les liens entre la gravitation et la théorie quantique.

LE PRINCIPE D'ÉQUIVALENCE

Un observateur est incapable de distinguer entre l'accélération que lui impriment les masses à l'origine d'un champ gravitationnel et une accélération qu'il subirait dans le vide de l'espace en l'absence de champ de gravitation : les effets d'une accélération sont indistinguables de ceux d'un champ de gravitation. Cette absence de distinction résulte de l'équivalence entre la masse gravitationnelle et la masse inertielle.



Spectrum de la Wissenschaft Ende-Gand

En 1884 déjà, le physicien allemand Heinrich Hertz décrivait dans ses cours magistraux le fait que « deux quantités de matière ont les mêmes effets gravitationnels si elles ont la même inertie, quels que soient les matériaux qui les constituent ». Il s'étonnait du fait que ces deux propriétés puissent être décrites de façons indépendantes, mais qui s'avèrent expérimentalement équivalentes. Il supposait qu'une explication « simple et compréhensible » serait possible, laquelle nous donnerait des aperçus profonds sur la constitution de la matière. »

Trente ans plus tard, Albert Einstein fournissait enfin cette explication avec sa théorie de la relativité générale. Il y unifiât l'inertie et la gravitation par l'intermédiaire d'une structure géométrique commune à l'espace et au temps : l'espace-temps. Au contraire de l'espace rigide et indépendant de la matière donné une fois pour toutes en physique newtonienne, la structure de l'espace-temps est sans cesse influencée par la matière et ses mouvements. Pour un physicien, cette interdépendance de la matière et de l'espace-temps est plus satisfaisante que l'action unilatérale exercée par un espace « absolu » sur la matière dans la conception newtonienne.

La conception géométrique de la gravitation n'a de sens que si toutes les formes de masse et d'énergie « voient » la même structure d'espace-temps et y réagissent de façon universelle. C'est exactement ce qu'exprime le principe d'équivalence. Aujourd'hui, une formulation standard s'en est dégagée, qui combine trois propositions.

Universalité de la chute libre

La première est qu'une masse test (une masse assez petite pour que sa propre attraction gravitationnelle soit négligeable) suit dans un champ gravitationnel une trajectoire qui ne dépend que de sa position, de l'instant et de sa vitesse de départ. En particulier, sa composition chimique ne joue aucun rôle. Sur Terre, il s'ensuit que deux objets qu'on laisse tomber au même endroit et au même instant sont accélérés de façon identique, si le frottement de l'air est négligeable : en d'autres termes, tous les corps lâchés dans les mêmes conditions initiales tombent à la même vitesse. Galilée avait déjà compris l'universalité de la chute libre, même si le fait qu'il l'aurait prouvé

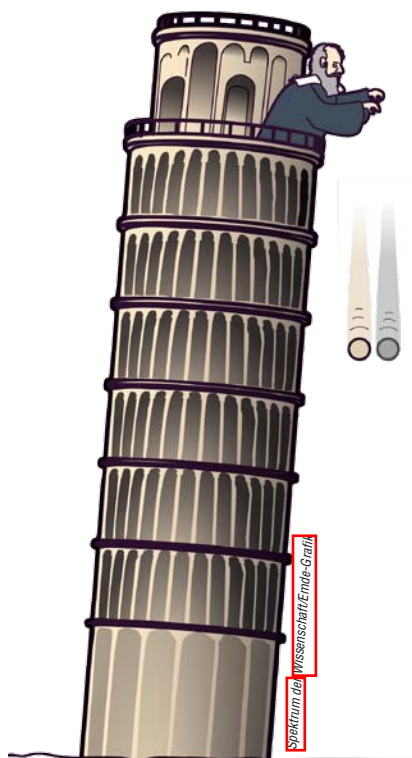
la longueur de Planck et la taille d'un grain de sable qu'il y en a entre cette dernière et celle de l'Univers visible...

Dans le cadre de leur quête des ondes gravitationnelles, les physiciens sont devenus capables de mesurer des longueurs 1000 fois plus petites que la taille d'un proton. Mais 20 ordres de grandeur les séparent encore de la longueur de Planck...

Cependant, a-t-on vraiment besoin de construire une théorie quantique de la gravitation pour savoir si un atome tombe comme une pierre ? Et en a-t-on besoin pour s'interroger sur le sens de cette question quand l'atome se trouve dans un état de position ambigu – une superposition d'états comme en prévoit la théorie quantique ?

Pas vraiment, car les rapports réciproques de la matière et de la gravitation sont clairement régis par ce principe fondamental de la relativité générale qu'est le principe d'équivalence. Il stipule que la masse gravitationnelle – la grandeur en jeu dans la chute des corps – et la masse inertielle – la masse liée à l'inertie, c'est-à-dire le facteur de proportionnalité entre la force et l'accélération – sont identiques.

En vertu de ce principe d'équivalence, un corps plongé dans un champ gravitationnel, tel celui de la Terre, se comporte en tout point comme un corps soumis à une accélération en l'absence de champ gravitationnel. Il nous est ainsi impossible de savoir, sans autre indice, si la force qui nous plaque contre le plancher d'un ascenseur est notre propre poids ou si elle résulte de l'accélération uniforme de la cabine en l'absence de toute attraction gravitationnelle.



Spectrum de la Wissenschaft Ende-Gand

2. L'UNIVERSALITÉ DE LA CHUTE LIBRE, c'est-à-dire le fait que tous les corps lâchés simultanément de la même hauteur tombent de la même façon et arrivent ensemble au sol, est une conséquence du principe d'équivalence. Le premier physicien qui a testé cette propriété fut Galilée. Selon la légende, il l'aurait fait en faisant tomber des objets depuis le haut de la tour de Pise.

par des expériences effectuées depuis le haut de la tour de Pise n'a rien de certain (voir la figure 2).

Pour mettre en évidence une éventuelle violation de l'universalité de la chute libre, il faudrait que des mesures assez précises montrent que l'égalité entre masse gravitationnelle et masse inertielle n'est pas toujours vraie.

Le paramètre d'Eötvös, noté η (éta) et nommé d'après le physicien hongrois Loránd Eötvös (1848-1919), a été défini pour caractériser l'étendue de la violation: il est égal à la différence entre les masses gravitationnelle et inertielle, divisée par leur valeur moyenne. Au début du XX^e siècle, Eötvös a pu établir à l'aide de balances de torsion que η est inférieur à 10^{-8} , soit un centième de millionième. Cette limite a été divisée par 100 000 depuis que l'équipe du projet *Eöt-Wash*, de l'Université de Washington à Seattle, s'est servie de masses tests en béryllium et en titane pour montrer que η est inférieur à 10^{-13} . Des expériences sont en préparation pour réduire d'un facteur 100 cette limite actuelle de η . L'une d'elles, où une masse test en alliage de platine et de rhodium chutera de concert avec une masse test de titane, sera embarquée à bord du satellite *Microscope* du CNES (Centre national d'études spatiales), mission qui devrait se dérouler vers 2016.

La deuxième proposition du principe d'équivalence dans sa formulation standard est le fait que le résultat d'une expérience physique menée en un lieu ne dépend ni de son orientation dans l'espace, ni de sa vitesse. Ce fondement de la pensée d'Einstein sur l'espace-temps traduit le dépassement du concept d'éther auquel faisaient appel les théories anciennes. En effet, si quelque substance portant ce nom remplissait l'Univers, on s'attendrait à ce qu'un mouvement par rapport à elle exerce une influence sur les phénomènes physiques.

C'est ce qu'avaient tenté de mettre en évidence Albert Michelson et Edward Morley dans une célèbre expérience, réalisée d'abord par Michelson en 1881 en Allemagne, puis en 1887 par les deux physiciens à l'aide d'un appareillage amélioré à l'Université d'État de Cleveland, aux États-Unis. Dans cette expérience, un faisceau lumineux est scindé en deux sous-faisceaux qui parcourent des chemins perpendiculaires, avant de se rejoindre et interférer dans un même détecteur (voir la

figure 3). Comme la figure d'interférence est très sensible aux temps de parcours des deux sous-faisceaux, elle permet de mesurer avec précision une éventuelle différence entre les vitesses de la lumière dans deux directions différentes.

Le résultat de cette expérience fut négatif, et l'est resté depuis, quelle que soit la précision expérimentale atteinte. Ses versions récentes indiquent qu'une éventuelle différence relative de la vitesse de la lumière dans deux directions perpendiculaires est inférieure à 10^{-17} .

Décalage vers le rouge

La troisième proposition du principe d'équivalence dans sa formulation standard est l'idée qu'un champ gravitationnel influe sur la marche des horloges qui y sont soumises. La théorie de la relativité générale indique en effet que la fréquence du rayonnement émis par un atome placé dans un champ gravitationnel est perçue comme plus basse par un observateur situé en un lieu de potentiel gravitationnel supérieur (le potentiel mesure l'énergie emmagasinée; sur Terre, le potentiel gravitationnel augmente avec l'altitude). Il s'agit du « décalage gravitationnel vers le rouge ».

À propos de cet effet, le principe d'équivalence fournit deux règles générales. La première est que des horloges fonctionnant selon des principes différents et qui suivent la même trajectoire dans l'espace-temps doivent rester synchrones. Un exemple de

test de cette règle est fourni par le cas de deux horloges atomiques, l'une au césium et l'autre à hydrogène (un maser à hydrogène) qui seront toutes deux embarquées à bord de la Station spatiale internationale, lors de l'expérience ACES, prévue vers 2016.

La seconde règle est que deux horloges de construction identique et qui suivent des trajectoires différentes dans un champ gravitationnel afficheront une différence de temps qui est universelle, c'est-à-dire qu'elle dépend seulement du champ gravitationnel traversé, et pas du type d'horloge ni des autres champs présents.

On décrit les possibles violations de l'universalité du décalage gravitationnel vers le rouge à l'aide d'un paramètre noté α , qui est nul si le principe d'équivalence est valide. Le meilleur test de l'universalité du décalage gravitationnel vers le rouge a été réalisé en 1976 au cours de l'expérience *Gravity Probe A*, où une fusée américaine emporta jusqu'à 10 000 kilomètres d'altitude un maser à hydrogène. Durant les deux heures du vol, les chercheurs comparèrent le temps donné par cette horloge atomique à celui d'une horloge identique restée sur Terre, ce qui a imposé à α une limite supérieure égale à 7×10^{-5} .

Cette expérience a fonctionné parce que le champ gravitationnel de la Terre varie avec l'altitude, ce qui fait évoluer la fréquence relative des deux horloges d'environ 10^{-16} par mètre. Les horloges les plus précises d'aujourd'hui – les horloges atomiques optiques – sont dix fois plus précises que les

Les unités de Planck

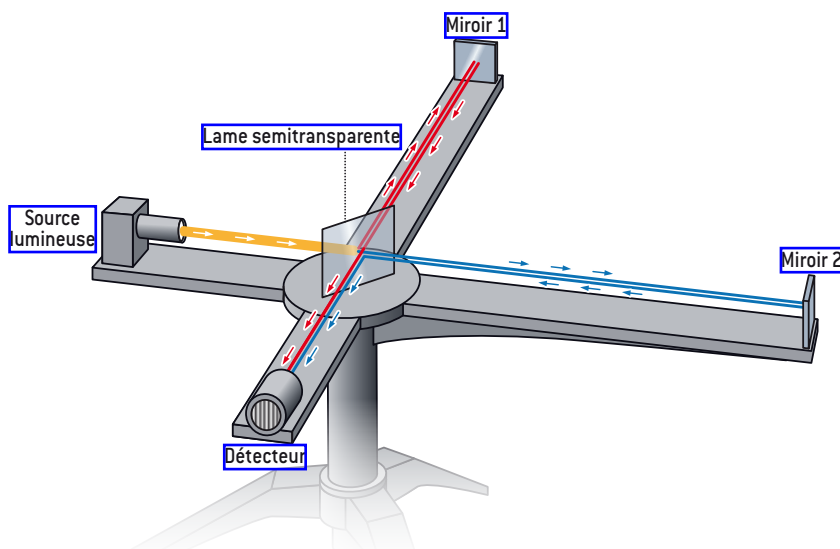
Trois constantes ont, en physique moderne, une signification fondamentale. Dans la théorie quantique, la constante de Planck h relie l'énergie d'une particule à sa fréquence intrinsèque,

c'est-à-dire à la fréquence qui caractérise son comportement ondulatoire. La vitesse de la lumière c est une constante fondamentale de la théorie de la relativité restreinte. Enfin, la constante de la gravitation G relie les masses à l'attraction qu'elles exercent. On peut combiner ces trois

constantes pour construire un système d'unités qui serait naturel dans une théorie quantique de la gravitation: les unités de Planck. On utilise ici la constante de Planck réduite $\hbar = h/(2\pi)$.
– Longueur de Planck: $L_P = \sqrt{\hbar G/c^3} = 1,62 \times 10^{-35}$ mètre.
– Temps de Planck:

$T_P = \sqrt{\hbar G/c^5}$
 $= 5,39 \times 10^{-44}$ seconde.
– Masse de Planck: $M_P = \sqrt{\hbar c/G}$
 $= 2,18 \times 10^{-8}$ kilogramme.

Les unités de Planck indiquent à partir de quels ordres de grandeur le pouvoir descriptif de nos théories actuelles prend fin, en l'absence d'une théorie de la gravitation quantique. Autrement dit, c'est à ces ordres de grandeur que devraient intervenir à la fois les effets quantiques et ceux de la gravitation.



3. DANS L'INTERFÉROMÈTRE DE MICHELSON-MORLEY, une onde lumineuse est dédoublée par une lame séparatrice en deux sous-faisceaux, qui convergent après avoir parcouru deux chemins différents. La position des franges d'interférence observées sur un écran dépend de la différence entre les temps de parcours le long des deux bras de l'interféromètre. L'expérience a montré que les temps de parcours sont toujours identiques, ce qui implique que la vitesse de la lumière est indépendante du mouvement de l'observateur : c'est une constante absolue.

masers à hydrogène, c'est-à-dire qu'elles ne varient que d'une seconde en 10^{17} secondes, soit à peu près trois milliards d'années. Des chercheurs de l'Institut américain des étalons et de la technologie (le NIST) ont pu mettre en évidence le décalage gravitationnel vers le rouge à une altitude de seulement 33 centimètres. Toutefois, les horloges atomiques optiques ne pourront améliorer la précision de *Gravity Probe A* que si on les porte à des altitudes de plusieurs kilomètres.

Point remarquable, la troisième partie du principe d'équivalence a été testée avec une précision bien inférieure à celle des deux premières. Or la validité du principe d'équivalence ne saurait être que celle de sa partie la plus faible ! Cette situation pousse les physiciens à concevoir de nouvelles expériences portant sur le décalage gravitationnel vers le rouge.

Ainsi vint l'idée d'un nouveau type d'expériences, fondées sur des processus quantiques et se déroulant non pas à des échelles cosmiques, mais à des échelles atomiques. Certes, confronter le monde quantique avec le monde de la relativité générale exige d'énormes efforts. Mais les physiciens espèrent de nouveaux aperçus fondamentaux de ces tests poussés du principe d'équivalence. Or nous ne sommes pas sûrs de connaître toutes les forces à l'œuvre dans l'Univers, de sorte que tout indice sur cette question serait précieux.

On connaît aujourd'hui quatre interactions fondamentales : deux forces agissant à l'échelle subatomique, les interactions dites forte et faible, et les deux forces plus familières que sont l'électromagnétisme et la gravitation, qui déterminent les structures physiques depuis l'échelle atomique jusqu'à l'échelle cosmique. Si l'on suppose qu'il existe d'autres interactions, si faibles qu'elles ne modifient pas la structure de la matière, pourrait-on les observer ?

Des interactions supplémentaires ?

Le physicien américain Robert Henry Dicke (1917-1997) s'est posé cette question dès la fin des années 1950. Il souligna que des interactions supplémentaires violant le principe d'équivalence pourraient se manifester par leurs effets sur la gravitation. Ce serait en particulier le cas s'il existait un champ de force supplémentaire n'agissant pas sur la totalité de la masse au sens d'Einstein (la grandeur m vérifiant $E = mc^2$), à laquelle contribuent toutes les formes d'énergie. Au lieu de cela, cette force supplémentaire pourrait dépendre de la nature de la matière, ce qui violerait le principe de l'universalité de la chute libre. C'est pourquoi il est important d'effectuer des tests expérimentaux en utilisant des matériaux divers, dont on comparera les effets gravitationnels subis.

Jusqu'ici purement hypothétique, la possibilité de ces forces supplémentaires apparaît déjà dans les théories d'unification des interactions fondées sur des espaces-temps à plus de quatre dimensions, dont la théorie des cordes est un exemple. Les violations de l'universalité de la chute libre pourraient s'y manifester pour des valeurs du paramètre d'Eötvös de l'ordre de 10^{-15} , gamme de valeurs dont se rapprochent les expériences prévues.

La façon la plus simple de mesurer l'accélération due à la gravitation à la surface de la Terre consiste à mesurer l'altitude d'un objet, à le lâcher, puis à chronométrer sa chute. Peut-on reproduire cette expérience familière à l'échelle atomique ? Hormis les difficultés techniques, la dualité onde-corpuscule, c'est-à-dire le fait que tout objet quantique est de nature à la fois corpusculaire et ondulatoire, peut être mise à profit. Elle implique en effet qu'au mouvement du centre de masse d'un objet quantique tel qu'un atome est associée la propagation d'une onde de matière.

Dès lors, il devient possible de réaliser des expériences d'interférence, c'est-à-dire d'exploiter le fait que, comme les autres ondes, les ondes de matière peuvent interférer. On peut ainsi concevoir des dispositifs qui scindent les ondes de matière et les réunissent à nouveau pour les faire interférer et produire une figure d'interférence, laquelle livre des informations sur le champ gravitationnel traversé par les ondes.

En 1999, l'équipe de S. Chu, à l'Université Stanford, a pu mesurer, en faisant appel à des procédures quantiques, le temps de chute d'un atome de césium. Ils ont atteint une précision de trois parties pour un milliard, valeur qu'ils ont comparée avec le temps de chute d'un corps macroscopique en verre (un petit prisme pyramidal), mesuré avec précision à l'aide de lasers. Aucune différence entre les temps de chute n'a été constatée (aux incertitudes de mesure près), ce qui impliquait que le paramètre d'Eötvös, pour un unique atome de césium et l'objet en verre, est inférieur à 10^{-9} .

Quatre ordres de grandeur séparent cette limite de celles déterminées antérieurement. Ce résultat ne semble pas spectaculaire, mais il est tout de même remarquable en raison de la nouveauté de la comparaison effectuée : d'un côté, un atome isolé dans un état quantique, et de l'autre un objet macroscopique ! Les

chercheurs ont donc réussi à tester la validité de l'universalité de la chute libre en comparant le comportement dans le champ gravitationnel terrestre d'un élément de matière « quantique » (l'atome) avec un élément de matière « classique » (l'objet macroscopique en verre).

Curieusement, cette même expérience pourrait aussi servir à tester l'universalité du décalage gravitationnel vers le rouge, du moins d'après une interprétation proposée en 2010. Dans ce cas, le paramètre mesurant la violation de l'universalité du décalage gravitationnel vers le rouge pourrait passer au-dessous de 10^{-9} , ce qui améliorerait le test de la validité du principe d'équivalence.

La nouvelle interprétation proposée de l'expérience de S. Chu a déclenché une controverse quant au sens à donner à ce qui se produit physiquement. Ironiquement, deux des principaux protagonistes de l'affaire – d'un côté S. Chu, de l'autre Claude Cohen-Tannoudji, de l'École normale supérieure à Paris – partagent le prix Nobel de 1997. Ainsi, même les spé-

cialistes les plus éminents d'aujourd'hui ne s'accordent pas sur l'interprétation à donner aux mesures interférométriques portant sur la chute libre d'atomes.

Une interprétation débattue

S. Chu a réalisé l'expérience initiale et a contribué à l'élaboration de sa nouvelle interprétation, avancée par Holger Müller, de l'Université de Californie à Berkeley. En janvier 2013, H. Müller a proposé une nouvelle expérience sur le même principe. C'est la fiabilité des conclusions tirées à partir de son interprétation que contestent C. Cohen-Tannoudji et ses collègues (voir l'encadré ci-dessous).

Les problématiques fondamentales en jeu concernent aussi bien notre compréhension de la théorie quantique que la question : qu'est-ce qu'une horloge ? Afin de mieux comprendre l'objet du débat, précisons en quoi consiste l'expérience d'interférométrie atomique effectuée en 1999 par l'équipe de S. Chu. Ces chercheurs ont réalisé un

interféromètre atomique, c'est-à-dire un dispositif conçu pour faire interférer plusieurs ondes de matière, issues en fait du même atome.

L'appareil est construit de façon à produire un choc élastique (où l'énergie cinétique est conservée) entre un photon laser bien choisi et l'atome. Sous l'effet de cette interaction, l'atome a la même probabilité d'être mesuré dans l'un de deux états de quantité de mouvement, sans que l'on puisse savoir dans lequel des deux il se trouve avant la mesure.

En d'autres termes, une première impulsion laser – l'impulsion séparatrice – place l'atome dans une superposition quantique de deux états de la quantité de mouvement, ce qui revient à dire que l'atome emprunte simultanément deux trajectoires... Et si l'impulsion laser est émise verticalement, les deux trajectoires atomiques atteignent des altitudes différentes. Une autre impulsion laser agissant sur chaque onde atomique comme un miroir – l'impulsion unificatrice – réunit ensuite les deux trajectoires, ce qui fait interférer les deux ondes de matière.

Mesure-t-on le décalage gravitationnel vers le rouge de la fréquence de Compton ?

Une des prédictions centrales de la relativité générale est que la gravitation modifie les fréquences d'horloge. Cet effet est connu sous le nom de décalage vers le rouge dû à la gravitation. Ce décalage gravitationnel joue un rôle important

dans la mesure du temps, et il a été testé avec une grande précision. L'amélioration de cette précision constitue l'objectif principal du projet ACES. Des horloges atomiques fourniront des signaux électromagnétiques périodiques dans l'environnement de chute libre de la Station spatiale internationale (ISS) afin de vérifier que les fréquences d'horloge dépendent du potentiel gravitationnel, comme le prévoit la relativité générale. Ce sera fait par l'échange de signaux électromagnétiques entre les horloges sur l'ISS et des horloges au sol. Le mouvement de l'ISS et des antennes au sol sera contrôlé pour prendre en compte les décalages par effet Doppler qui apparaissent

nécessairement dans ces comparaisons d'horloge.

La situation est très différente dans les expériences d'interférométrie atomique qui ont démarré dans le groupe de S. Chu il y a plus de dix ans. Ces expériences ont été, depuis, analysées comme une mesure de l'accélération de chute libre d'atomes, pouvant mener à un test de l'universalité de la chute libre par comparaison avec des mesures portant sur un coin de cube en chute libre.

Bien que sa précision soit inférieure à celle des tests sur des masses macroscopiques de compositions différentes, ce test est très important puisque c'est le plus sensible qui compare la chute libre d'objets quantiques

et classiques. Holger Müller, Achim Peters et Steven Chu en ont récemment proposé une réinterprétation, où ils considèrent maintenant que ces expériences mesurent le décalage gravitationnel sur l'horloge quantique fonctionnant à la fréquence de Compton, associée à la masse au repos de l'atome de césium, soit à $3,2 \times 10^{25}$ hertz.

Peter Wolf, Luc Blanchet,

Christian Bordé, Christophe Salomon, Claude Cohen-Tannoudji et moi-même ne sommes pas d'accord avec cette réinterprétation. Selon nous, de telles expériences ne peuvent pas être comparées directement avec des tests d'horloge. Le mouvement des atomes n'est pas contrôlé dans l'interféromètre et il est déduit de la théorie en utilisant les mêmes équations d'évolution qui servent à calculer le déphasage. En utilisant la théorie d'une façon cohérente, on démontre

que la contribution au déphasage qui est proportionnelle à la fréquence de Compton et inclut une contribution du décalage gravitationnel est en fait exactement nulle. Le déphasage total provient entièrement des interactions avec les lasers et du fait que les atomes tombent par rapport au laboratoire où l'expérience est faite.

L'interféromètre atomique

fonctionne en fait comme un accéléromètre qui mesure l'accélération d'atomes en chute libre par rapport à la plate-forme expérimentale qui est au repos dans le laboratoire. Si l'instrument était mis globalement en chute libre, cette accélération s'annulerait. La situation est complètement différente pour les horloges atomiques utilisées pour tester le décalage gravitationnel.

– Serge Reynaud
Laboratoire Kastler-Brossel,
École normale supérieure, Paris

La figure d'interférence est déterminée par le déphasage des deux ondes atomiques, qui traduit la différence des chemins parcourus. Ce déphasage détermine où l'interférence est constructive (probabilité élevée de trouver l'atome) et où elle est destructive (probabilité faible).

Or le calcul en théorie quantique montre que le déphasage $\Delta\phi$ est proportionnel à l'accélération gravitationnelle locale (la pesanteur g), à la quantité de mouvement transférée par le photon laser et au carré du temps d'interrogation (le temps T écoulé entre l'impulsion séparatrice et l'impulsion unificatrice): $\Delta\phi = k g T^2$, où k est, à un facteur simple près, la quantité de mouvement transférée. Ainsi, la forme des interférences livre, *via* le déphasage, la valeur du champ gravitationnel pendant la chute libre de l'atome placé dans une superposition quantique d'états.

Pourvu que la valeur du champ trouvée soit la même que celle s'appliquant à celle de la masse test en verre, on a ainsi testé l'universalité de la chute libre d'une nouvelle façon, par un procédé quantique. Mais le même interféromètre permet-il aussi de tester l'universalité du décalage gravitationnel vers le rouge ?

D'après les physiciens qui pensent que oui, chaque atome équivaut à une horloge battant à un certain rythme. D'après la théorie de la relativité générale, l'horloge de l'onde atomique allant plus haut que l'autre se trouve soumise à un potentiel gravitationnel supérieur; elle bat donc la mesure plus vite jusqu'à la fin de son parcours, ce qui contribue au déphasage des deux ondes. Or cette contribution gravitationnelle est proportionnelle à la différence des potentiels gravitationnels, qui dépend de la différence des altitudes atteintes, et celle-ci dépend à son tour de la quantité de mouvement transférée k et du temps T . En fait, on trouve exactement la même formule ($\Delta\phi' = k g T^2$), où $\Delta\phi'$ désigne cette fois le déphasage dû au décalage gravitationnel vers le rouge.

Toutefois, ce calcul est fondé sur une hypothèse à l'origine de toute la controverse: que les atomes de césium fournissent bien un signal d'horloge. Pour cela, ils doivent battre le temps assez vite pour qu'un décalage vers le rouge soit mesurable. Nous avons déjà indiqué qu'avec des horloges atomiques, un décalage gravitationnel vers le rouge a pu être mesuré avec une différence d'altitude de 33 centimètres, mais dans l'expérience

de 1999, cette différence n'était que d'un dixième de millimètre... Pour parvenir à une précision relative de 10^{-9} , l'horloge doit battre plus vite en proportion – de l'ordre de 10^{12} fois plus vite que la meilleure horloge atomique actuelle.

C'est le cas si l'on considère que l'atome bat le temps à sa « fréquence de Compton », égale à l'énergie totale de l'atome divisée par la constante de Planck. Cette fréquence



4. LES LAURÉATS DU PRIX NOBEL DE 1997
Claude Cohen-Tannoudji (*en haut*) et Steven Chu (*en bas*) ne sont pas d'accord quant à la possibilité que l'expérience d'interférométrie atomique mise au point par l'équipe de S. Chu en 1999 puisse contrôler l'universalité du décalage gravitationnel vers le rouge, la partie du principe d'équivalence la moins bien testée.

de Compton est extrêmement élevée: de l'ordre de 3×10^{25} hertz, c'est-à-dire supérieure d'un facteur 10^{12} aux fréquences typiques des horloges atomiques... Il faut noter toutefois que l'hypothèse que les atomes de césium peuvent être considérés comme des horloges naturelles n'est pas nécessaire pour déterminer le déphasage des deux ondes atomiques: elle ne sert qu'à interpréter ce déphasage comme un

équivalent au décalage gravitationnel vers le rouge, ce qui nous ramène à la question fondamentale autour de laquelle tourne la controverse des chercheurs: les atomes de césium sont-ils des horloges naturelles ?

Le long des deux chemins parcourus dans l'interféromètre, l'énergie des atomes a une valeur bien définie. Ce n'est que pendant la durée très brève de l'interaction avec le laser que certains des atomes sautent d'un état stationnaire d'énergie à un état voisin. Une véritable horloge, en revanche, pour pouvoir livrer le temps en continu, doit varier au cours du temps: elle ne saurait, comme c'est le cas des atomes de césium pendant leur vol, rester dans un état stationnaire pendant son fonctionnement.

C'est pourquoi les atomes employés dans les horloges atomiques ordinaires ne se trouvent jamais dans un tel état d'énergie indépendant du temps, mais dans une superposition de tels états, qui dépend du temps. La différence de leurs énergies – et non pas l'énergie totale – divisée par la constante de Planck donne la fréquence à laquelle bat une horloge atomique. Jusqu'à présent, dans les meilleurs dispositifs de mesure du temps, les horloges atomiques optiques, cette fréquence est de l'ordre de celle des ondes lumineuses visibles (d'où le qualificatif « optique »).

Une horloge propre à l'atome ?

Les chercheurs autour de H. Müller et S. Chu considèrent que tout corpuscule doté d'une masse peut être vu comme porteur d'une « horloge propre » par l'intermédiaire de sa fréquence de Compton. L'idée remonte au physicien français Louis de Broglie, l'inventeur en 1924 de la notion d'onde de matière. De Broglie a relié l'équivalence masse-énergie découverte par Einstein à la vision de Planck selon laquelle à toute énergie peut être associée une fréquence. Il remarqua toutefois lui-même que son hypothèse conduisait à une contradiction: le processus périodique associé à un corpuscule en mouvement devait, à cause de la dilatation du temps – un effet relativiste –, apparaître ralenti. D'un autre côté, la fréquence devait aussi être plus élevée, car elle est proportionnelle à l'énergie du corpuscule, donc augmente avec son énergie cinétique.

De Broglie distinguait pour cette raison deux fréquences: celle d'un hypothétique



ZARM - PHOTON-ENTWICKELUNGSSCHNITT



ZARM - UNIVERSITÄT DE BRÈME

5. LA TOUR D'IMPESANTEUR DE BRÈME (à gauche) a été construite pour réaliser des expériences de chute libre à l'intérieur d'une capsule (à droite) de 80 centimètres de largeur tombant dans une colonne de 110 mètres de haut, où règne le vide. En bas, l'impact est amorti par un réceptacle rempli de petites billes de polystyrène. Les quelque cinq secondes de chute libre, donc d'apesanteur, ainsi créées servent le plus souvent à tester des dispositifs spatiaux, mais elles peuvent aussi être mises à profit pour tester le principe d'équivalence.

«processus interne», caractérisé par la fréquence de Compton, et celle d'une onde de matière associée au mouvement de l'objet.

L'équation de Schrödinger développée deux ans après ces considérations a fourni la description mathématique générale de la propagation de cette onde de matière. De cette équation on déduit que dans le cas d'un atome isolé, un processus périodique n'est observable que quand cet atome se trouve dans une superposition d'états d'énergie bien déterminés (états propres). Les fréquences possibles d'un tel processus dépendent des différences entre les énergies de ces états propres. Cette propriété est au fondement des horloges atomiques modernes.

Il s'agit ici des fréquences liées à l'onde de matière. Et pour la «fréquence interne»? N'a-t-elle aucune signification pratique, ou gagne-t-elle au cours de la propagation de la particule dans le champ gravitationnel une signification sur laquelle les théoriciens doivent encore s'accorder?

À l'intersection entre les théories de la gravitation et la théorie quantique apparaissent donc des questions conceptuelles concernant chacune des deux théories. Remarquons que nous n'avons jusqu'à présent eu affaire qu'à une situation physique relativement simple: un système quantique dans un champ gravitationnel classique. La prochaine étape logique consisterait à décrire ce champ et ses interactions avec un atome dans le cadre de la théorie quantique, au moins en partie. Des différences notables entre la gravitation et les autres

interactions devraient se manifester. Toutes les tentatives faites jusqu'à présent pour formuler une théorie de la gravitation sont parties du principe que les règles quantiques habituelles s'appliquent à la gravitation. Or ces règles n'ont fait la preuve de leur efficacité qu'avec d'autres interactions, succès qui ne signifie pas que nous ayons vraiment compris leur physique profonde. Des expériences comme celle de l'interféromètre atomique pourraient fournir aux théoriciens des indices sur les liens entre la relativité générale et la théorie quantique, les deux piliers de la physique fondamentale d'aujourd'hui.

Améliorer la précision en prolongeant la chute

À présent, les physiciens tentent d'améliorer la précision expérimentale en augmentant le temps de vol des atomes dans l'interféromètre. Le déphasage des ondes atomiques augmente en effet avec le carré du temps d'interrogation, tandis qu'il n'est que proportionnel au champ gravitationnel. Il serait possible d'augmenter ce temps de vol en réalisant par exemple l'expérience au cours d'une chute contrôlée dans une tour d'impesanteur (voir la figure 5), ou en embarquant le dispositif expérimental sur un satellite. Il existe désormais un réel espoir de préciser quelles relations entretiennent la gravitation et la théorie quantique, et notamment d'envisager le principe d'équivalence d'Einstein d'un point de vue quantique. ■

L'AUTEUR



Domenico GIULINI est professeur de physique théorique à l'Université Leibniz,

à Hanovre en Allemagne.

BIBLIOGRAPHIE

D. Schlippert et al., Quantum test of the universality of free fall, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 112, 203002, 2014.

S.-Y. Lan et al., A clock directly linking time to a particle's mass, *Science*, vol. 339, pp. 554-557, 2013.

P. Wolf et al., Does an atom interferometer test the gravitational redshift at the Compton frequency?, *Classical Quantum Gravity*, vol. 28, 145017, 2011.

H. Müller et al., A precision measurement of the gravitational redshift by the interference of matter waves, *Nature*, vol. 463, pp. 926-930, 2010.

Vaclav Smil

Beaucoup espèrent un passage rapide aux énergies renouvelables. Mais l'histoire des transitions énergétiques montre qu'elles nécessitent deux à trois générations.



Énergies renouvelables :

L'ESSENTIEL

■ Les transitions

énergétiques majeures – du bois au charbon, puis du charbon au pétrole – ont pris chacune 50 à 60 ans.

■ L'abandon des ressources fossiles et le passage aux énergies renouvelables ne devrait pas être plus rapide. Dans les pays industrialisés, les énergies renouvelables classiques, telle l'hydroélectricité, sont déjà utilisées au maximum.

■ On pourrait toutefois accélérer la transition, notamment en réalisant des économies d'énergie.



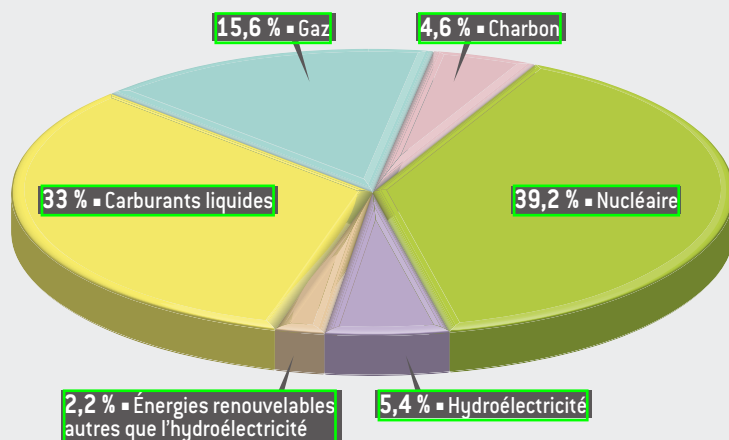
l'essor sera lent



Il y a près de 40 ans, l'écologue américain Amory Lovins affirmait qu'en l'an 2000, 33 pour cent de l'énergie produite aux États-Unis proviendraient de sources renouvelables nombreuses, petites et décentralisées. En 2008, Al Gore, l'ancien vice-président, jugeait réalisable le passage de ce pays à 100 pour cent d'énergies renouvelables en une décennie, et ce à un coût abordable. En 2009, Mark Jacobson, de l'Université Stanford, et Mark Delucchi, de l'Université de Californie, à Davis, présentaient un plan pour effectuer une telle transition à l'échelle mondiale d'ici 2030.

Cependant, de 1990 à 2012, la part des combustibles fossiles dans la consommation d'énergie mondiale a à peine changé, passant de 88 à 87 pour cent. En 2011, les sources renouvelables ont fourni moins de dix pour cent de l'énergie des États-Unis, et il s'agissait pour la plupart de sources classiques, telles que les centrales hydroélectriques et le bois. Après plus de 20 ans de développement subventionné, les « nouvelles » sources d'énergie renouvelable, tels l'éolien, le solaire et les biocarburants, ne représentaient que 3,35 pour cent de l'approvisionnement énergétique des États-Unis.

La lenteur de cette transition énergétique n'est pas surprenante. En fait, elle était prévisible. Partout dans



LE BOUQUET ÉNERGÉTIQUE FRANÇAIS (ici en 2012) est dominé par le nucléaire. Les énergies renouvelables, pour l'essentiel sous forme d'hydroélectricité, n'en représentent que 7,6 pour cent. Dans ces chiffres livrés par le Service statistique de la Société BP, les biocarburants sont comptés dans les carburants liquides et non dans les énergies renouvelables (ils représentaient un peu moins de un pour cent de la consommation énergétique française en 2011, selon les données du Service de l'observation et des statistiques). En outre, le bois n'est pas pris en compte (3,7 pour cent de la consommation énergétique française en 2011). À l'échelle mondiale, en 2012, le charbon et le gaz représentaient chacun environ 30 pour cent du bouquet énergétique, le gaz 24 pour cent, le nucléaire 4 pour cent et les énergies renouvelables 9 pour cent.

Le monde, chaque transition majeure entre deux combustibles a pris de 50 à 60 ans. Un passage du bois au charbon s'est d'abord produit, puis le pétrole est devenu prédominant. Aujourd'hui, les États-Unis connaissent une troisième transition énergétique majeure, du charbon et du pétrole vers le gaz naturel. Entre 2001 et 2012, les consommations américaines de charbon et de pétrole brut ont chuté respectivement de 20 pour cent et de 7 pour cent; dans le même temps, la consommation de gaz naturel a augmenté de 14 pour cent. Cependant, une décennie ou deux seront encore nécessaires avant que le gaz ne dépasse le charbon, qui fournit plus du tiers de l'électricité des États-Unis.

Les énergies renouvelables ne « décollent » pas plus vite que les nouveaux combustibles autrefois, et il n'y a aucune raison technique ou économique de penser qu'elles vont le faire. La demande énergétique mondiale augmente notablement, au point qu'il est déjà difficile de la satisfaire avec les sources d'énergies traditionnelles. Cela le serait encore plus avec les énergies renouvelables.

Le changement peut être plus rapide dans certains pays, mais, à l'échelle mondiale, le passage aux énergies renouvelables sera lent, en particulier si la conversion au gaz naturel se confirme. Bien sûr, il est possible qu'une technologie innovante ou

Même avec l'essor des machines industrielles, le charbon n'était pas la source d'énergie dominante au XIX^e siècle.

une décision politique accélère ce changement. Il reste qu'en général, les transitions énergétiques prennent du temps.

L'espoir d'une transition rapide et radicale vers les énergies renouvelables résulte d'une méconnaissance de l'histoire des deux derniers siècles. La plupart des gens pensent qu'au XIX^e siècle, où s'est produite une industrialisation rapide, la consommation énergétique mondiale a été dominée par le charbon, que le XX^e siècle a été l'ère du pétrole, et que le siècle actuel sera celui des énergies renouvelables. Les deux premières opinions sont fausses, la troisième discutable.

Même avec l'essor des machines industrielles, le charbon n'était pas la source d'énergie dominante au XIX^e siècle. Le bois, le charbon de bois (à ne pas confondre avec le charbon – la houille –, qui est une roche sédimentaire) et les résidus de céréales (principalement de la paille) ont fourni 85 pour cent de l'énergie mondiale consommée pendant cette période – soit environ 2,4 yottajoules (un yottajoule, YJ en abrégé, vaut 10²⁴ joules).

Le charbon a commencé à représenter plus de cinq pour cent de l'énergie consommée vers 1840, et en 1900 il n'assurait encore que la moitié de la production. Cette augmentation de 5 à 50 pour cent a donc pris de 50 à 60 ans. Aux États-Unis, il fallut attendre 1885 pour que les combustibles fossiles (surtout du charbon, un peu de pétrole et une très faible quantité de gaz naturel) fournissent plus d'énergie que le bois et le charbon de bois. La bascule s'est produite en 1875 en France et en 1901 au Japon, mais seulement en 1930 en Union soviétique, en 1965 en Chine et à la fin des années 1970 en Inde.

De même, au XX^e siècle, la plus importante source d'énergie n'était pas le pétrole, mais le charbon. Ce dernier a culminé à environ 55 pour cent de la production énergétique mondiale au cours des années 1910. Le pétrole, déjà utilisé à cette époque, ne l'a dépassé qu'en 1964. Et comme ce déclin relatif s'est accompagné d'une augmentation constante de la demande mondiale d'énergie, le charbon a continué à être très utilisé. Finalement, c'est lui qui a fourni le plus d'énergie au XX^e siècle : environ 5,3 yottajoules, contre 4 yottajoules pour le pétrole.

Seuls deux pays importants sur le plan économique ont réalisé la troisième transition, celle du pétrole au gaz naturel. La

consommation de ce dernier a dépassé celle de pétrole brut en Union soviétique en 1984, et au Royaume-Uni en 1999.

Pour montrer que les transitions énergétiques sont lentes et progressives, j'ai étudié la vitesse à laquelle les sources d'énergie ont progressé, à partir du moment où elles atteignaient cinq pour cent du bouquet global. Les trois transitions successives présentent des similitudes notables (voir l'encadré ci-dessous). Ainsi, de 1840 à 1900, la part du charbon a évolué à une vitesse voisine de celle du pétrole entre 1915 (année où il a atteint cinq pour cent) et 1975. Le gaz naturel a fourni cinq pour cent de l'énergie mondiale vers 1930 et devrait bientôt en représenter 33 pour cent. Des trois combustibles, c'est celui qui a pris le plus de temps pour atteindre 25 pour cent de la consommation énergétique : environ 55 ans, contre 35 ans pour le charbon et 40 ans pour le pétrole.

Bien sûr, les trois séquences ne permettent pas de déduire le rythme des transitions énergétiques futures. Et la transition suivante pourrait être accélérée par une percée technologique vers une énergie nucléaire sûre et bon marché ou vers un dispositif de stockage massif de l'énergie d'origine éolienne ou solaire.

Deux ou trois générations pour une transition

Cependant, le fait que les trois premières transitions énergétiques se soient effectuées à un rythme similaire est remarquable, en particulier parce que les techniques d'extraction, les canaux de distribution et les machines utilisatrices (tel un moteur de train) varient notablement d'un combustible à l'autre. À l'échelle mondiale, les investissements et les infrastructures nécessaires pour qu'une nouvelle source

d'énergie s'impose requièrent deux à trois générations, soit 50 à 75 ans.

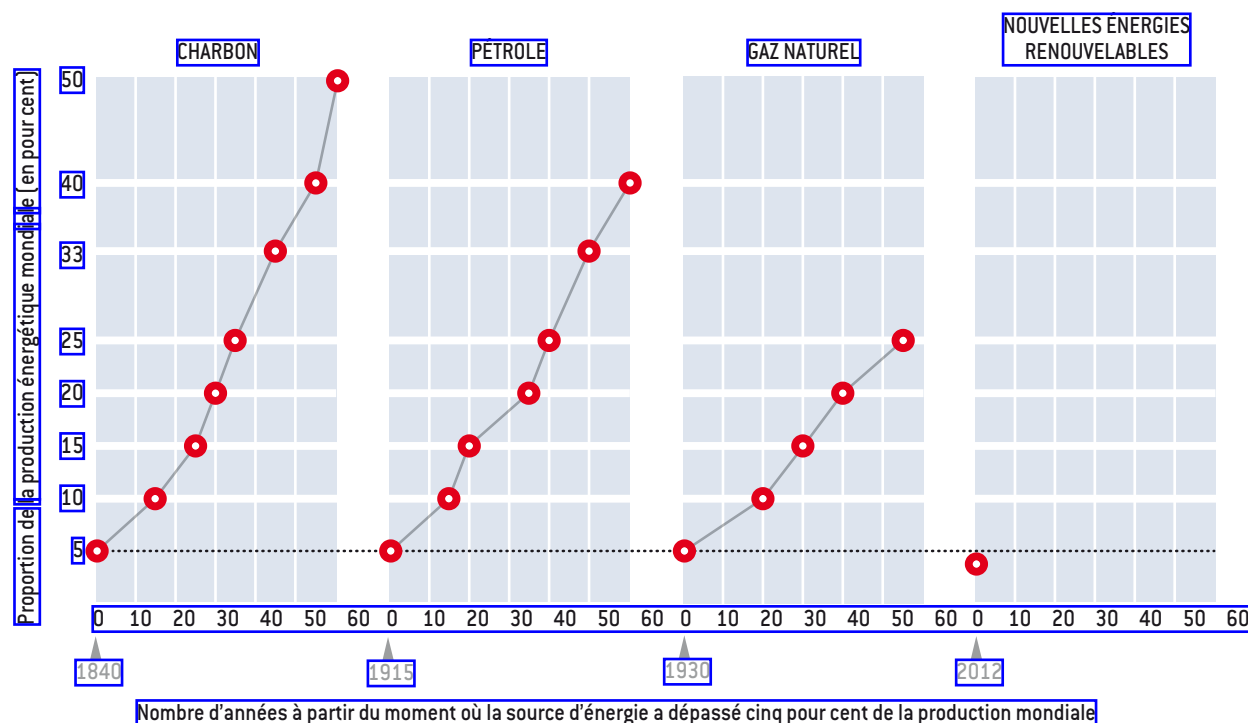
Jusqu'ici, les énergies renouvelables suivent la même évolution lente. En 2011, elles ont fourni 9,4 pour cent de l'énergie consommée par les États-Unis, qui était d'environ 103×10^{18} joules. Les énergies renouvelables classiques ont représenté six pour cent, répartis entre les centrales hydroélectriques (3,25 pour cent), le bois (2 pour cent, essentiellement des déchets issus d'opérations de débitage), et, pour une part modeste, la biomasse et la géothermie.

Les « nouvelles » énergies renouvelables n'ont fourni que 3,35 pour cent du total, avec des parts respectives de 2, 1,19 et 0,16 pour cent pour les biocarburants liquides, l'éolien et le solaire. Dans les pays industrialisés, ces trois dernières sources devront assurer la quasi-totalité de la croissance des énergies renouvelables, car le potentiel des autres, en particulier

DES TRANSITIONS QUI DEMANDENT DES DÉCENNIES

Chaque source d'énergie qui a dominé l'approvisionnement mondial a mis 50 à 60 ans pour parvenir à son point culminant. Le charbon a atteint cinq pour cent de l'approvisionnement mondial en 1840 (en bas à gauche) et a progressivement pris le pas sur le bois : environ 60 ans plus tard, vers 1900, il représentait la moitié de la consommation énergétique. Lors des transitions suivantes, les parts du pétrole et du gaz naturel ont augmenté de façon voisine après avoir

passé la barre des cinq pour cent. Le pétrole n'a pas encore atteint 50 pour cent et n'y parviendra peut-être jamais. La part du gaz naturel évolue encore et augmente plus lentement. Les sources modernes d'énergie renouvelable – l'éolien, le solaire et les biocarburants liquides – ne représentent qu'environ 3,4 pour cent du total. À moins d'une rupture technologique ou politique, la transition vers ces énergies devrait, elle aussi, être longue.



l'énergie hydroélectrique, est déjà presque entièrement exploité.

La transition vers des énergies renouvelables pose plusieurs difficultés. La première est la quantité considérable d'énergie à produire. En 2012, les énergies fossiles ont fourni environ 450 exajoules (450×10^{18} joules) dans le monde. C'est 20 fois plus que durant les années 1890, quand le charbon a pris le pas sur le bois. Assurer la production d'autant d'énergie avec de nouvelles sources reste un défi.

L'obstacle de l'intermittence...

Une autre difficulté est la nature intermittente des énergies solaire et éolienne. Nos sociétés modernes ont besoin d'un approvisionnement fiable et ininterrompu en électricité et font face à une demande nocturne croissante. Aux États-Unis, le charbon et les centrales nucléaires assurent la « charge de base », c'est-à-dire la part de l'électricité produite en continu tout au long de la journée ; en France, cette charge est surtout assurée par le nucléaire. Les centrales hydroélectriques et les centrales au gaz, susceptibles d'être démarrées ou éteintes rapidement, réagissent aux périodes de pointe : elles fournissent le supplément d'énergie nécessaire pour satisfaire les pics de demande, brefs mais intenses, à certains moments de la journée.

L'éolien et le solaire peuvent contribuer à la charge de base, mais sans l'assurer de façon continue. En effet, le vent ne souffle pas en permanence, le Soleil ne brille pas la nuit et l'apport énergétique de ces deux sources est difficile à prévoir. Dans certains pays bien avancés sur la voie du renouvelable, telle l'Allemagne, l'éolien et le solaire fournissent une quantité d'énergie très variable. Parfois négligeable, cette quantité atteint la moitié de la demande à certains moments ensoleillés et venteux. Ces fluctuations importantes nécessitent soit un recours à d'autres centrales électriques, qui brûlent en général du charbon ou du gaz, soit une augmentation des importations d'électricité. Dans le cas de l'Allemagne, cela peut perturber l'alimentation électrique de certains pays voisins.

Les nouvelles énergies renouvelables se développeraient bien plus vite s'il existait un moyen peu coûteux de stocker l'énergie. On pourrait alors mettre en réserve les énormes surplus produits par l'éolien et le solaire quand la demande est faible,

L'AUTEUR



Vaclav SMIL est professeur émérite à l'Université du Manitoba, au Canada. Il est l'auteur de plus d'une trentaine d'ouvrages portant sur l'énergie et l'environnement.

SUR LE WEB

Bilan énergétique mondial en 2012 : www.bp.com/content/dam/bp/pdf/statistical-review/statistical_review_of_world_energy_2013.pdf

BIBLIOGRAPHIE

R. Mosseri et C. Jeandel (éds.), *L'énergie à découvert*, CNRS Éditions, 2013.

V. Smil, *Energy Transitions: History, Requirements, Prospects*, Praeger, 2010.

Énergies à volonté !, Dossier *Pour la Science* n° 69, octobre-décembre 2010.

M. Jacobson et M. Delucchi, *Énergies renouvelables : comment couvrir les besoins mondiaux en 2030*, *Pour la Science*, n° 386, décembre 2009.

afin de les utiliser pour satisfaire les pics de demande. Malheureusement, malgré plusieurs décennies de recherche, on ne dispose que d'une seule technique applicable à grande échelle : quand l'énergie est en excès, on l'utilise pour pomper de l'eau jusqu'à un réservoir situé en altitude, puis, quand elle manque, on déverse l'eau à travers une turbine pour produire de l'électricité. Peu d'endroits présentent la variation d'altitude nécessaire à ce dispositif, qui entraîne en outre des pertes d'énergie.

Une autre solution consiste à construire un réseau de centrales éoliennes et solaires assez vaste pour couvrir une région de la taille d'une grande nation ou de la moitié d'un continent, et à les relier par des lignes électriques. Ainsi, on optimiserait les chances pour qu'au moins une partie des centrales soit toujours en mesure de fournir de l'énergie au réseau. Des lignes d'une qualité et d'une longueur suffisantes sont techniquement réalisables, mais elles coûtent cher et suscitent souvent une forte opposition locale : aux États-Unis comme en Allemagne, la pose de nouvelles lignes est approuvée à un rythme très lent.

...et celui des infrastructures

Enfin, l'adoption en masse des énergies renouvelables devrait nécessiter une réorganisation fondamentale des infrastructures énergétiques. Pour l'électricité, on passerait d'un assez petit nombre de grandes centrales thermiques ou hydroélectriques à une multitude de petits systèmes éoliens et solaires, répartis sur le territoire. Les carburants liquides ne seraient plus produits par extraction du sous-sol d'un pétrole à forte densité énergétique, mais par la culture de végétaux et la fabrication de biocarburants, à densité énergétique plus faible. Pour bien des raisons, la transition vers les énergies renouvelables est plus contraignante que le passage du charbon au pétrole, puis du pétrole au gaz naturel.

Le dernier facteur qui allongera la durée de la transition est la préexistence d'infrastructures importantes et coûteuses, adaptées au système énergétique actuel : mines de charbon, puits de pétrole, gazoducs, raffineries, stations-service par millions... Même si nous disposions d'une énergie renouvelable presque gratuite, il serait économiquement impensable pour les États, les grandes entre-

prises ou les municipalités d'abandonner les énormes investissements consentis pour ces installations, d'une valeur estimée à au moins 20 000 milliards de dollars à l'échelle mondiale. Selon mes calculs, entre 2001 et 2010, la Chine a dépensé 500 milliards de dollars (365 milliards d'euros) pour construire des centrales au charbon, d'une capacité totale de 300 gigawatts – supérieure à ce que peuvent produire à partir d'énergies fossiles l'Allemagne, la France, le Royaume-Uni, l'Italie et l'Espagne réunis. Ces centrales sont prévues pour fonctionner au moins 30 ans. Aucun pays ne peut renoncer à de tels investissements.

La transition reste souhaitable

Soyons clairs. Outre les émissions de gaz à effet de serre, de nombreuses raisons environnementales poussent à réduire la dépendance vis-à-vis des combustibles fossiles. La combustion de ces derniers émet des oxydes de soufre et d'azote, qui entraînent des pluies acides et un brouillard photochimique (formé par la transformation de polluants sous l'effet de la lumière). Elle dégage aussi de la suie, qui accroît le réchauffement climatique, et des métaux lourds, dangereux pour la santé. En outre, l'exploitation des combustibles fossiles pollue les eaux et abîme les sols. Le basculement vers des énergies non fossiles est donc souhaitable, bien que certaines des solutions énergétiques alternatives aient aussi un impact notable sur l'environnement.

Savoir que cette transition prendra plusieurs décennies influe sur les choix à faire. Jusqu'ici, les politiques énergétiques et environnementales n'ont pas été à la hauteur. Au lieu de lubies à court terme et d'engagements pris à la légère, nous avons besoin de politiques à long terme, fondées sur des attentes réalistes.

Pour y parvenir, nous devons éviter d'être trop sélectifs dans les recherches. Les gouvernements ne peuvent pas prévoir quelles technologies seront injectées sur le marché, et ils ne devraient donc pas se concentrer uniquement sur certaines pistes telles que les réacteurs nucléaires à neutrons rapides ou les véhicules électriques fonctionnant avec une pile à combustible à l'hydrogène. La meilleure stratégie est d'investir dans une grande variété d'activités de recherche. Qui aurait deviné dans les années 1980 que, durant les trois

Un élément inédit : le facteur climatique

La lenteur des transitions énergétiques n'est pas surprenante, notamment en raison de la lourdeur des infrastructures. Une centrale nucléaire est construite en dix ans et fonctionne pendant une quarantaine d'années ; la constante de temps caractéristique est donc d'un demi-siècle.

Cependant, un nouveau facteur entre en jeu pour la transition énergétique en cours : selon les études scientifiques fiables, nous devons diviser par deux les émissions mondiales de gaz à effet de serre d'ici 2050 pour éviter un changement climatique de trop grande ampleur (2 °C maximum). Il reste donc moins de 35 ans.

Cela peut paraître hors d'atteinte du fait des inerties décrites dans l'analyse historique de V. Smil, mais le facteur climatique implique que la transition ne soit plus gouvernée par les seuls facteurs écono-

miques et technologiques : des politiques volontaristes peuvent jouer un rôle. De nombreuses études visent donc à accélérer la transition. Dans certaines d'entre elles, on élabore différents scénarios globaux de réduction des émissions et on en modélise l'impact sur le climat à l'échelle mondiale. Ainsi, l'étude AMPERE, financée par la Commission européenne, indique que le réchauffement peut être limité à 2 °C à condition d'agir dès maintenant et vigoureusement, en combinant des actions de réduction de la demande (gains

d'efficacité énergétique, isolation des bâtiments, etc.) et de décarbonisation de l'offre (passage aux énergies renouvelables ou nucléaire, séquestration du carbone). Si l'on attend 2030, il sera trop tard.

D'autres études, tel le projet *Deep Decarbonisation Pathways*, commandité par l'ONU, partent plutôt d'une échelle nationale, afin d'évaluer les réductions possibles en fonction des caractéristiques et des priorités politiques de chaque pays. En combinant ces deux approches, on cherche à identifier quelles politiques publiques permettraient de réduire l'écart entre ce qui est souhaitable et ce qui est réalisable. L'avenir du climat en dépend.

– Patrick Cricqui
directeur du laboratoire
EDDEN, CNRS

décennies suivantes, le meilleur retour sur investissement aux États-Unis concernerait non pas les réacteurs nucléaires ou les cellules photovoltaïques, mais le forage horizontal et la fracturation hydraulique pour l'exploitation des gaz de schiste ?

Les subventions peuvent accélérer la transition, mais elles doivent être guidées par des évaluations réalistes des technologies et des entreprises. On éviterait ainsi de répéter le cas de Solyndra, un fabricant de systèmes photovoltaïques qui a reçu 535 millions de dollars (environ 380 millions d'euros) du gouvernement américain, avant de faire faillite.

En outre, les prix de l'énergie devraient refléter les coûts réels, incluant ceux associés aux impacts sur l'environnement et sur la santé, immédiats et à long terme. Ces impacts sont variés : gaz à effet de serre et suie pour les combustibles fossiles, érosion des sols et manque d'eau provoqué par la consommation des céréales pour le bioéthanol, etc. Les prix doivent aussi intégrer les investissements nécessaires, tels ceux associés à la construction d'un super-réseau à haute tension pour relier

des fermes éoliennes et solaires éloignées les unes des autres. Les habitants et les responsables politiques des pays industrialisés doivent comprendre que le prix de l'énergie, bien qu'en augmentation, a été particulièrement bas durant les 50 dernières années. Ces populations devraient payer plus pour prendre en compte les conséquences environnementales et sanitaires de l'énergie.

La façon la plus efficace d'accélérer la transition et l'abandon des sources fossiles est de réduire la consommation énergétique mondiale. Plus la demande augmente vite, plus il est difficile d'en satisfaire une part importante avec les énergies renouvelables. Des études récentes ont montré qu'aucun problème technique insurmontable n'empêche de réduire d'un tiers la consommation d'énergie, à la fois dans les pays émergents et dans les pays riches, notamment grâce à des gains en efficacité.

Qu'elles soient nationales ou mondiales, les transitions énergétiques prennent du temps. Le virage qui se dessine actuellement, des combustibles fossiles vers les énergies renouvelables, ne fera pas exception. Il nécessitera des générations de persévérance. ■

La sélection de livres

■ POUR LA SCIENCE

*Mathématiques, astronomie, aéronautique...
Découvrez notre sélection de livres scientifiques et partez
à la découverte de l'Univers et des étoiles, du cerveau,
des catastrophes naturelles... et bien d'autres sujets encore !*



Nouveauté L'exploration des planètes

De Galilée à nos jours... et au-delà

Thérèse Encrenaz et James Lequeux

Réf. 70116195

En retraçant la conquête pacifique du système solaire, ce livre met à la portée d'un large public les démarches et les résultats des générations d'astronomes qui se sont succédées depuis Galilée. Il ouvre sur une nouvelle dimension de la planétologie avec la découverte récente de près d'un millier d'exoplanètes... où peut-être d'autres formes de vie seront détectées ?

Éditions Belin 2014 – 224 pages – 24,50 € - ISBN 978-2-7011-6195-2

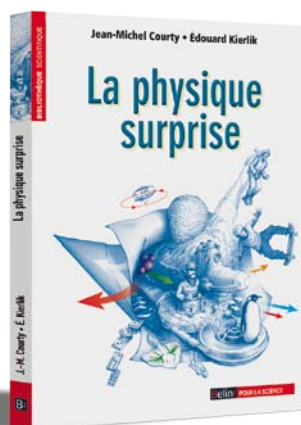
Nouveauté La physique surprise

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

Réf. 84245121

Passionnés de physique et curieux de tout, Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik vous invitent à une nouvelle promenade sur ces chemins de traverse dans un langage accessible, simple et imagé, sans jargon ni formules. Avec eux, laissez-vous surprendre par un phénomène physique que vous avez déjà côtoyé sans même le remarquer !

Éditions Belin-Pour la Science 2013 – 184 pages - 24 € - ISBN 978-2-8424-5121-9



Nouveauté Des catastrophes...

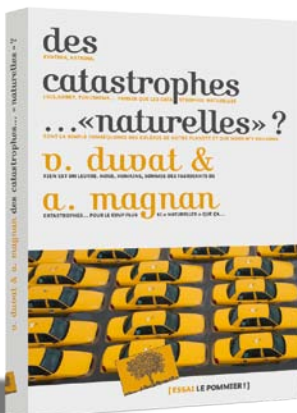
« naturelles » ?

Virginie Duvat et Alexandre Magnan

Réf. 74650679*

Xynthia, Katrina, Fukushima... Penser que les catastrophes naturelles sont la conséquence des colères de la nature et que nous n'y pouvons rien, c'est se voiler la face. Tempêtes, tremblements de terre et autres tsunamis ont certes une origine naturelle, mais les dégâts considérables qu'ils provoquent sont à mettre au crédit des sociétés humaines. Nous sommes des fabricants de catastrophes, pour le coup plus si « naturelles » que ça...

Éditions Le Pommier 2014 – 312 pages – 23 € - ISBN 978-2-7465-0679-4



Les marchands de doute

Naomi Oreskes et Erik M. Conway

Réf. 74650727*



Les lobbys industriels ont élaboré une stratégie qui a consisté à nier les preuves scientifiques de la dangerosité du tabac, de la réalité du trou de la couche d'ozone,

des nuisances des pluies acides du réchauffement climatique. L'ouvrage témoigne de l'importance des faits scientifiques dans le débat public et de la vulnérabilité de la société mondiale face aux « marchands de doute ».

Éditions Le Pommier 2014 – 544 pages – 12 €
978-2-7465-0727-2



Classification phylogénétique du vivant

Tome 1 – 3^e édition

Guillaume Lecointre,
Hervé Le Guyader

Réf. 70114273

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

Éditions Belin 2006 – 560 pages – 43 €
978-2-7011-4273-9



Classification phylogénétique du vivant

Tome 2

Guillaume Lecointre,
Hervé Le Guyader

Réf. 70113456

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

Éditions Belin 2013 – 608 pages – 39,90 €
978-2-7011-3456-7

En partenariat avec les éditeurs

Belin:
ÉDITEUR INDÉPENDANT
DEPUIS 1777

Le Pommier

Pour commander ces ouvrages www.pourlascience.fr/librairie*

ou en renvoyant le bon de commande ci-contre.

* Pour commander les titres édités par Le Pommier : www.editions-belin.fr

HISTOIRE DES SCIENCES

Coriolis, théoricien de la mécanique appliquée

Chacun ou presque a entendu parler de la force de Coriolis, cause de la rotation des vents sur la Terre. Mais l'ingénieur-savant qui a donné son nom à cette force est méconnu, comme l'est son œuvre scientifique pourtant riche.

Alexandre Moatti

Coriolis : la célébrité de ce nom rattaché à une force est quasi universelle. Mais le décalage entre cette célébrité et le caractère largement méconnu de Gaspard-Gustave de Coriolis (1792-1843), de son œuvre scientifique et de sa carrière est étonnant. Or, comme nous allons le voir, Coriolis a joué un rôle clef dans le développement de la science mécanique. Il est en outre représentatif d'une période particulièrement faste de la science en France et caractéristique des très originaux « ingénieurs-savants » de cette époque.

Né à Paris d'une famille noble mais déshéritée, Coriolis intègre en 1808 l'École polytechnique, créée sous la Révolution en 1794, puis le Corps des Ponts et Chaussées en 1810. C'était, à l'époque, la voie royale de la science : de nombreux scientifiques de cet âge d'or, celui où la science se faisait en France, étaient issus de Polytechnique et des Ponts, tels les mathématiciens Cauchy ou Liouville, le chimiste Gay-Lussac, les physiciens Fresnel ou Navier. Peu intéressés par le « service ordinaire » des Ponts (celui des travaux publics en province), ces savants dans l'âme s'orientaient rapidement vers des postes d'enseignement, à l'École polytechnique notamment.

Après un bref intermède en province, Coriolis devient répétiteur d'analyse à Polytechnique en 1817. Il le restera jusqu'en 1838, date à laquelle il est nommé directeur des études dans cette même école. Ce poste de responsabilités ne lui convient guère et lui

causera beaucoup de tracas, jusqu'à sa mort de la tuberculose, à l'âge de 51 ans.

Répétiteur du cours d'analyse de Cauchy, Coriolis est mentionné plusieurs fois par ce dernier dans ses manuels, en remerciements de diverses idées mathématiques. Mais il s'épanouit davantage dans ses travaux de recherche que dans son enseignement. En 1819, il écrit des *Notes sur la théorie des machines*, qui sont citées par nombre de ses collègues dans leurs livres imprimés ; malgré leur importance pour la naissance et la datation de certains concepts, ces notes n'ont jamais été retrouvées (d'où l'intérêt de la conservation des documents scientifiques !).

L'inventeur du « travail »

En 1826, répondant à un concours lancé par l'Académie, Coriolis propose de nommer « travail » le produit scalaire de la force par le déplacement (c'est-à-dire le produit de la composante de la force dans la direction du déplacement par la distance sur laquelle s'effectue le déplacement). Ce terme, qui remplaçait les appellations les plus diverses (quantité d'action, moment d'activité, etc.), a fini par s'imposer et est celui en usage aujourd'hui.

Surtout, Coriolis donne toute sa consistance à cette notion de travail, en montrant que c'est une véritable grandeur physique (le frottement correspond à une perte de travail, comme la sciure correspond à une

perte de volume lorsqu'on scie du bois]. Dans son ouvrage princeps, le *Calcul de l'effet des machines* (1829), il recommande de modifier la notion de « force vive » en $\frac{1}{2}mv^2$, au lieu de mv^2 (m étant la masse d'un corps mobile et v sa vitesse). La notion de force vive provenait de l'observation faite au XVII^e siècle de la conservation de mv^2 dans les systèmes mécaniques. Banale en apparence, cette modification (un coefficient $\frac{1}{2}$) était en fait très cohérente avec sa définition du travail (voir l'encadré page 74).

Coriolis lutte aussi contre certaines idées reçues sur le travail : ainsi, le poids « ne travaille pas » sur une route horizontale (la force et le déplacement étant perpendiculaires, leur produit scalaire est nul), seul compte le frottement – on peut s'en convaincre en poussant avec le doigt un bloc de fonte de 100 kilogrammes sur une patinoire.

Après avoir défini le travail, Coriolis est l'un des premiers à s'intéresser au mouvement relatif, ce qui donnera naissance en 1831 à la notion de force d'entraînement (force qu'imprime un support accéléré à un objet immobile par rapport au support), et en 1835 à celle de force centrifuge composée – qui plus tard portera le nom de force de Coriolis (nous y reviendrons). Ces travaux prenaient naissance dans la théorie des machines : quel est par exemple le mouvement de l'eau dans l'aube d'une roue de moulin, sachant que cette roue est elle-même en rotation ?

Cette théorie des machines constituait une nouvelle branche scientifique issue des

progrès de la technique : roues hydrauliques, machines de Watt – sources d'énergie des usines de la première révolution industrielle (filatures, minoteries, forges, etc.).

Coriolis était un « ingénieur-savant ». Ce joli nom a été donné par l'historien et philosophe des sciences britannique Ivor Grattan-Guinness, l'un des meilleurs analystes de la période, à la trentaine de savants français œuvrant entre 1800 et 1840, presque tous issus de cette École polytechnique qui correspondait au projet qu'avaient Monge et la Convention de donner des forces vives à une France nouvelle.

Ingénieurs, ils aidaient au développement de l'industrie grâce à leurs connaissances scientifiques ; savants, ils faisaient avancer la science en lui adjoignant de nouvelles branches qu'ils théorisaient, s'appuyant sur leur expérience d'ingénieur. C'étaient, entre autres, Coriolis, Poncelet et la théorie des machines, Navier et l'hydraulique, Lamé et la résistance des matériaux, Fresnel et l'optique.

Des machines à la science

Contrairement à une image répandue, la science n'a pas toujours précédé la technique : à ce moment-là, elle rattrapait à marche forcée la technique – on savait faire fonctionner une machine à vapeur avant que Sadi Carnot (autre ingénieur-savant polytechnicien) ne jette, en 1824, les bases de ce que l'on nommera la thermodynamique.

La « mécanique appliquée », expression qui peut qualifier une partie des nouveaux domaines ci-dessus (la théorie des machines, l'hydraulique, la résistance des matériaux), venait compléter la mécanique dite rationnelle, celle de Lagrange, de Poisson et des mathématiciens, encore appelés géomètres à l'époque.

À la mécanique rationnelle, fondée sur la notion de force et qui pouvait rester purement conceptuelle, la mécanique appliquée apportait des éléments de réalité physique : les frottements, les chocs, les machines et leur mouvement. Mathématiciens par leur formation polytechnicienne et ingénieurs et d'une certaine manière physiciens (ce terme était encore fort peu employé), car

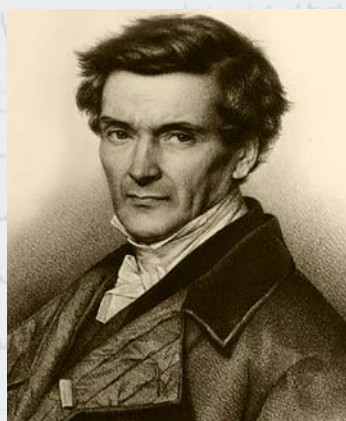
L'AUTEUR



Alexandre MOATTI est ingénieur en chef des Mines et chercheur associé à l'Université Paris-Diderot. Il est l'auteur du blog *Alterscience* sur la plate-forme SciLogs.fr (www.scilogs.fr/alterscience/).

BIBLIOGRAPHIE

A. Moatti, *Le mystère Coriolis*, CNRS Éditions, 2014.

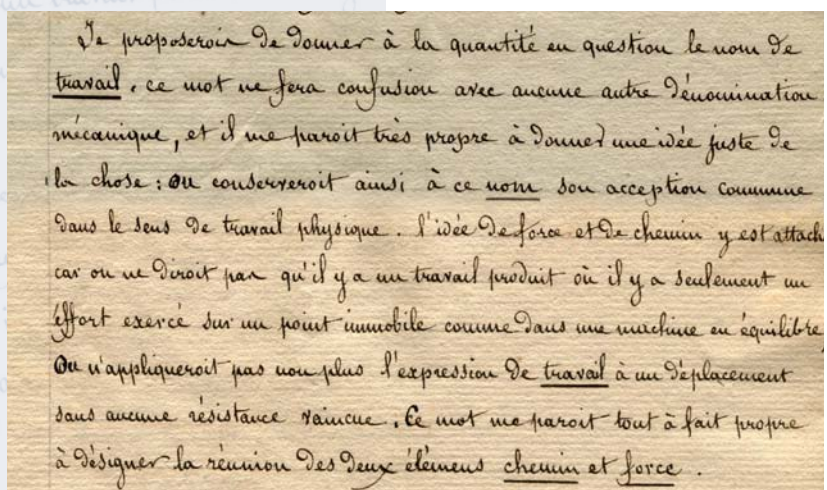


en contact avec la réalité, ces ingénieurs-savants étaient les mieux placés, à cette charnière entre mathématiques et physique, entre théorie et pratique, pour révéler ces apports de la mécanique appliquée à la science fondamentale.

Et, si l'on affine cette caractérisation, on peut placer Coriolis plus certainement du côté de la théorie que de la pratique : par son tempérament, par le caractère très mathématique de ses écrits, par le déroulement académique de sa carrière.

Après avoir formalisé la notion de travail, Coriolis lui donne une véritable cohérence en l'appliquant à de nombreux champs : raideur d'un ressort, roulage des voitures à chevaux, roues hydrauliques et même jeu de billard. Il définit le travail moteur, le travail résistant, le principe de transmission du travail, etc. Unissant par ce fil directeur divers objets et divers concepts, il a l'ambition de bâtir une véritable théorie du travail, expression qui revient souvent sous sa plume et qui pourrait caractériser son œuvre. Même si la formule a un aspect d'oxymore, Coriolis a été, de façon déterminante, un théoricien de la mécanique appliquée.

C'est du sein de cette mécanique appliquée qu'a jailli la célèbre force de Coriolis. Pour notre ingénieur-savant, il s'agissait initialement de rectifier une erreur commise par son collègue Jean-Victor Poncelet (lui aussi polytechnicien) dans la conception



1. PORTRAIT DE CORIOLIS ET UN PASSAGE de son manuscrit où il définit la notion de travail (pochette de la séance de l'Académie des sciences du 7 août 1826).

de sa roue à aubes courbes – qui avait pourtant reçu le prix de mécanique de l'Académie des sciences en 1825 ! Le mouvement de la goutte d'eau dans l'aube n'est pas le même à son arrivée (« amenée d'eau ») qu'à son départ (« dégagé d'eau ») : la roue a tourné entre-temps, et l'aube n'a plus la même inclinaison par rapport à la verticale, donc la gravité n'intervient pas de la même façon.

De la roue à aubes à la force de Coriolis

Coriolis prend le sujet dans sa plus grande généralité dynamique. En 1831, il étend au mouvement relatif la portée du principe des forces vives (ou de son nouveau « principe du travail »), en ajoutant le travail des forces d'entraînement. Ainsi, l'étude du mouvement de l'eau dans l'aube nécessite d'appliquer, dans le repère lié à l'aube, une force d'entraînement due au mouvement de la roue. Chacun a déjà fait l'expérience d'une force d'entraînement (ou force d'inertie, ou force centrifuge quand il s'agit d'une rotation) dans un train en mouvement ou le conçoit dans l'essorage d'une machine à sécher le linge.

Dans un second article, en 1835, Coriolis généralise son étude : dans le repère relatif,

il faut ajouter aux forces d'entraînement (F_e) les « forces centrifuges composées », égales « au double du produit de la vitesse angulaire des plans mobiles multipliée par la quantité de mouvement relatif projetée sur un plan perpendiculaire à cet axe » – soit le produit vectoriel $2m \mathbf{v} \wedge \boldsymbol{\Omega}$ où $\mathbf{v}$ est le vecteur vitesse relative (par exemple par rapport à l'aube), et $\boldsymbol{\Omega}$ le vecteur vitesse de rotation du repère (dirigé selon l'axe de rotation et ayant pour norme la vitesse angulaire de rotation). C'est l'expression de la force de Coriolis (F_c) telle qu'elle apparaît dans son calcul, et qui aboutit à une généralisation du principe de Newton (de $F = m\mathbf{a}$ à $F + F_e + F_c = m\mathbf{a}$, où $\mathbf{a}$ est ici le vecteur accélération dans le repère mobile).

On a mis du temps à comprendre la portée du résultat de Coriolis. Encore de nos jours, son approche par la dynamique est délaissée au profit d'une démonstration cinématique, plus accessible. Après la mort de Coriolis, le mathématicien et futur mandarin Joseph Bertrand (1822-1900) crut bon d'indiquer que c'était Clairaut qui avait trouvé le même résultat un siècle auparavant, ce qui est faux.

C'est finalement Charles-Eugène Delaunay (1816-1872, polytechnicien comme Bertrand) qui, 15 ans après la mort de Coriolis,

fera le lien entre cette force F_c et des effets jusqu'alors inexpliqués : la rotation du pendule de Foucault, le gyroscope, la déviation des corps vers l'Est dans l'hémisphère Nord, l'érosion unilatérale des rives des cours d'eau...

Dans cette même période, le météorologue américain William Ferrel (1817-1891) a mis en évidence des termes analogues à ceux de Coriolis. Ce n'est pas le moindre des paradoxes que constater que la force de Coriolis a trouvé de nos jours une universalité dans de nombreuses branches de la physique (météorologie, climatologie, géomagnétisme, astronomie...) fort éloignées de la théorie des machines chère à son inventeur !

Et l'homme, Coriolis ? Comme l'écrit joliment Erik Orsenna (*Portrait du Gulf Stream*, 2005), « Rien n'indique que notre Gaspard-Gustave ait jamais mis le pied sur un bateau ni qu'il se soit jamais intéressé à la mer. Le fait est là : pour les siècles des siècles, Coriolis est celui qui a expliqué l'influence de la rotation de la Terre sur le parcours des vents et des courants. »

On peut même aller plus loin : hormis quelques voyages d'études, missions et cures thermales en province, rien n'indique que Coriolis soit souvent sorti d'un petit périmètre parisien allant de la rue Descartes (École polytechnique) à la rue des Saints-Pères (École des Ponts et Chaussées).

Ces deux noms de rues ont d'ailleurs une forte charge symbolique : Coriolis alliait une rationalité scientifique dans sa vie professionnelle à une certaine ferveur religieuse dans sa vie personnelle. Mais jamais ces deux sujets n'étaient mêlés chez lui. Il vivait pour la science et pour l'enseignement – il est resté célibataire. Il avait une personnalité réservée et une vie recluse et sédentaire. Il ne mélangeait pas ses opinions politiques, plutôt royalistes et conservatrices, à sa pratique professionnelle – y compris durant la brève période où il occupa le poste de responsabilité de directeur des études à Polytechnique.

Si on le compare à d'autres savants qu'il a fréquentés, issus des mêmes études que lui, il n'a pas quitté la France pour des raisons politiques comme l'a fait Cauchy en 1830, il n'est pas devenu un homme politique comme Arago ou Le Verrier.

Des forces vives à l'énergie cinétique

Le « principe des forces vives », énoncé sous sa forme générale par Joseph-Louis Lagrange, ne nous parle plus guère. Il stipulait que la variation de la force vive mv^2 entre un état initial et un état final est $mv_f^2 - mv_i^2 = 2 \int F dx$.

Si l'on note $2W$ le membre de droite, W représente la somme des produits $F dx$, où F est la force appliquée au mobile le long d'un déplacement élémentaire dx . La quantité W était nommée indistinctement moment d'activité, quantité d'action, etc.

En divisant par 2 les deux membres de la rela-

tion ci-dessus, Coriolis a redéfini la force vive : « Cette force vive n'est que la moitié du produit de ce qu'on a désigné jusqu'à présent par ce nom, c'est-à-dire de la masse par le carré de la vitesse. »

Il a aussi nommé « travail » ce qui reste à droite de la relation, à savoir la quantité W . Le

pas franchi par Coriolis paraît anodin, mais la relation réécrite sous la forme

$$\frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_i^2 = W$$

nous est aujourd'hui bien plus familière et signifie, en termes modernes, que la variation de l'énergie cinétique ($\frac{1}{2}mv^2$) d'un mobile est égale au travail des forces qui lui ont été appliquées. Bien que l'énergie cinétique et d'autres concepts tels que l'énergie potentielle n'ont été définis que bien plus tard, Coriolis a été un maillon important dans la chaîne qui a conduit jusqu'à eux.

Coriolis illustre aussi à quel point certains chercheurs sont faits pour la science et non pour « l'administration de la recherche ». En 1839, alors directeur des études à Polytechnique, il propose une réforme de l'enseignement dans la « filière polytechnicienne ». Ce projet de bon sens, adapté aux réalités et aux nécessités (par exemple celle d'exiger le maniement du calcul différentiel à l'examen d'entrée), se heurte au conservatisme du « clan Arago » – le Secrétaire perpétuel, président du Conseil de perfectionnement de Polytechnique et homme politique qu'était Arago était plus « libéral » dans sa vision politique que dans sa gestion des institutions.

Coriolis se remettra difficilement de l'échec de son projet de réforme, et surtout du mode d'opposition rencontré, qui n'avait rien de rationnel ! De même, les luttes de pouvoir et d'influence pour les postes de professeur

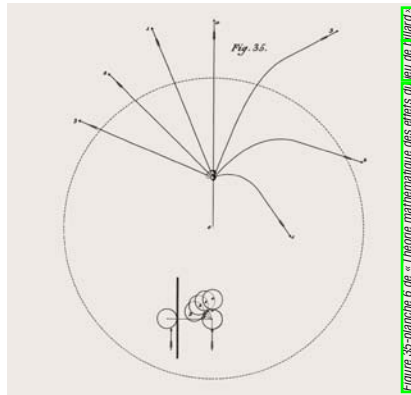


Figure 35: planche 6 de « Théorie mathématique des effets du jeu de billard »

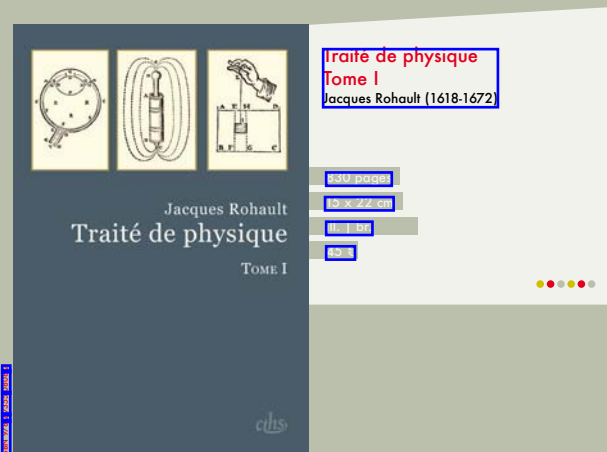
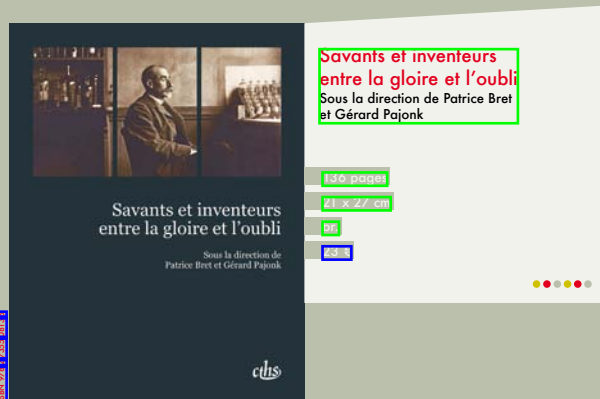
2. CORIOLIS EST AUSSI l'auteur en 1835 d'une *Théorie mathématique des effets du jeu de billard*, qui faisait suite à l'invention par Maingaud, capitaine des armées napoléoniennes, de la « queue à procédé » (rondelle hémisphérique en bout de la queue de billard). Cette invention permettait les « effets rétro », où la bille revient en arrière après un choc.

ou de répétiteur, à propos desquelles son avis de directeur des études était fort important, ont pesé sur son entrain.

Les écrits personnels de Coriolis réservent aussi des surprises : une utopie sur le duel, où en homme profondément chrétien, il propose de substituer aux armes (qui favorisent l'offenseur s'il est bon épéiste ou tireur) un « séjour d'intérêt général » comme soignant dans un hôpital ; un écrit sur la musique religieuse, où il s'élève contre une tendance à privilégier la performance vocale ; des notes éducatives à sa sœur Cécile... Finalement, en plus d'une cohérence certaine dans son œuvre scientifique et son parcours, c'est aussi un homme attachant, avec ses projets et ses échecs, ses démêlés avec ses collègues, son caractère idéaliste et romantique, que nous avons eu le plaisir de découvrir. ■

Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques

une collection complète d'instruments de travail pour la recherche en sciences humaines



Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques • ventes@cths.fr • vente en librairie ou sur notre site : www.cths.fr • Distribution Sodia

LOGIQUE & CALCUL

Un tour de cartes mathémagique

Pour réussir un bon tour de cartes, il faut être agile de ses mains... ou alors connaître les suites de de Bruijn.

Jean-Paul DELAHAYE

Le magicien sort un jeu de 32 cartes et le donne à un spectateur qui l'examine et n'y repère aucune anomalie : le jeu n'est pas composé de cartes identiques et n'est pas rangé selon un ordre évident. En y regardant de près, le spectateur s'assure même que toutes les cartes sont différentes et constituent un jeu complet. Le magicien demande au spectateur de couper le jeu, de prendre la carte du dessus, puis de passer le jeu à son voisin de droite, qui prend la carte du dessus et passe le jeu à son voisin de droite, etc. Quand cinq cartes ont ainsi été retirées, le jeu est posé sur une table et personne n'y touche plus. Le magicien indique qu'il va se livrer à un numéro de transmission de pensée multiple. Il demande aux cinq spectateurs de se concentrer intensément sur la carte qu'ils ont en main et qu'ils n'ont montrée à personne. Il va deviner les cinq cartes.

Le magicien ferme les yeux et se concentre. Au bout de quelques secondes, il semble gêné : « Je n'y arrive pas, vos flux mentaux se mélangent. Nous allons décomposer la transmission de pensée. Occupons-nous des cartes noires (pique ou trèfle). Les personnes parmi vous qui en ont se lèvent et se concentrent à nouveau sur la carte devant leurs yeux ». Le premier et le troisième spectateur se lèvent et tentent de transmettre mentalement l'image de leur carte.

Au bout de dix secondes, le magicien annonce : « C'est bon. Monsieur, vous avez le 10 de pique et vous, vous avez l'as de trèfle.

Maintenant je peux d'ailleurs déchiffrer le premier flux que j'ai reçu tout à l'heure, les trois autres cartes sont l'as de cœur, le 8 de carreau et le 9 de cœur ». Tout est exact ! Les cinq cartes choisies que les spectateurs montrent au public sont effectivement : 10♠, a♥, a♣, 8♦, 9♥.

Bien sûr, il n'y a pas de transmission de pensée. Le tour est purement mathématique. Voyez-vous l'astuce ?

Les suites de Nicolaas de Bruijn

La solution se trouve dans une notion étudiée par le mathématicien néerlandais Nicolaas Govert de Bruijn (Dick de Bruijn), né en 1918 et décédé en 2012. Ses travaux de recherche ont porté sur la théorie des graphes, l'analyse, la théorie des pavages apériodiques, les méthodes de démonstration automatique de théorèmes et les suites de nombres nommées aujourd'hui « suites de de Bruijn » qui donnent la solution du joli tour de cartes présenté ci-dessus.

L'importance mathématique et pratique de ces suites et des graphes associés va cependant bien au-delà de la prestidigitation, puisque ces notions jouent un rôle en bio-informatique où elles aident à recoller les nombreux petits bouts de séquences génétiques que les séquenceurs d'ADN produisent en désordre.

Réfléchissons au tour avec les cinq spectateurs. Vous avez noté qu'à aucun moment, le

jeu de cartes n'a été mélangé. Il est seulement examiné, puis coupé par le premier spectateur. Les cinq spectateurs ne choisissent pas cinq cartes indépendamment, mais cinq cartes consécutives déterminées par la coupe du premier spectateur, qui est bien sûr inconnue.

La mise en scène du tour conduit le magicien à connaître qui des cinq spectateurs possèdent des cartes noires et rouges. Il se pourrait qu'il n'y ait aucun joueur ayant une carte noire, il se pourrait qu'il y en ait un, ou deux, etc. Le magicien n'apprend pas seulement leur nombre, il apprend précisément lesquels des spectateurs ont des cartes noires et lesquels ont des cartes rouges. En tout, il y a 32 possibilités : le premier joueur peut avoir une rouge ou une noire (2 cas), de même que le second (2 cas), etc., ce qui donne $2 \times 2 \times 2 \times 2 = 32$ cas différents possibles. En voici la liste :

NNNNN-NNNNR-NNNRN-NNRRR-NNRNN-
NNRNR-NNRRN-NNRRR-NNNNN-NNRNR-
NNRNR-NRNRN-RRRRN-RRRRN-RRRRN-
RRRRR-RRRRN-RRRRN-RRRRN-RRRRN-
RRRRN-RRRRN-RRRRN-RRRRN-RRRRN-
RRRRN-RRRRN

Grâce à son petit baratin, le magicien sait lequel de ces 32 quintuplets est le bon (*souligné ci-dessus*). Le jeu de 32 cartes utilisé a été préparé dans un ordre particulier (nous y reviendrons) et il y a 32 façons de couper un jeu de 32 cartes. Le magicien ignore la coupe faite et c'est l'information qu'il doit retrouver. En résumé, le magicien reçoit durant le tour

une information équivalente à celle du choix d'un élément parmi 32 (cela correspond à 5 bits d'information), qui est exactement l'information dont il a besoin pour savoir où la coupe a été faite par le premier spectateur.

En termes de quantités d'information, il n'y a aucun miracle : il lui manquait 5 bits d'information (l'emplacement de la coupe), il en a reçu 5. Reste à savoir comment s'y prendre pour que les cinq bits reçus indiquent l'endroit où la coupe a été faite. Le problème est de trouver un ordre pour les 32 cartes tel qu'à partir de la connaissance de la couleur (noire ou rouge) de cinq cartes consécutives, le magicien sache toujours quelles sont ces cinq cartes, c'est-à-dire l'endroit où a été opérée la coupe du premier spectateur.

La question est équivalente à celle-ci : trouver une suite de 32 symboles N ou R comportant 16 N et 16 R et telle que les 32 façons de prendre cinq éléments consécutifs de la suite soient toutes différentes et correspondent aux 32 façons de composer une suite de cinq symboles N ou R. Notez bien qu'ici, quand on parle de cartes successives, on convient implicitement qu'après la dernière carte du paquet, on revient à la première : les cartes 30, 31, 32, 1, 2 sont donc pour nous cinq cartes consécutives.

Voici une solution à ce problème : **RRRRR-NRRRNRRNNNNRRRRNRRNNRRN**. Une telle suite de 32 symboles est nommée suite de de Bruijn d'ordre 5 ; en trouver et les étudier est exactement le problème auquel s'est intéressé en 1946 Nicolaas de Bruijn en résolvant une conjecture soumise quelque temps auparavant par un autre mathématicien.

Avec un jeu de 2^n cartes

Nous verrons plus loin comment trouver de telles suites. Nous envisagerons le cas général où, à la place de cinq spectateurs, il y en a n et où la taille du jeu de cartes est 2^n .

Vérifiez que la suite proposée ci-dessus est bonne : en en prenant 5 symboles consécutifs (il y a 32 façons de le faire), on retrouve les 32 quintuplets énumérés auparavant, chacun une fois exactement.

Avant de voir comment la suite de 32 N et R a été obtenue, terminons l'explication pratique du tour. En exploitant la suite des

1. Le tableau du magicien

Si vous classez un jeu de 32 cartes dans l'ordre $8\spadesuit 9\heartsuit r\heartsuit 7\heartsuit 10\diamondsuit v\clubsuit d\heartsuit 9\diamondsuit v\heartsuit 9\clubsuit 7\clubsuit d\diamondsuit 10\heartsuit 9\clubsuit r\clubsuit d\clubsuit r\clubsuit 10\clubsuit r\diamondsuit 8\heartsuit a\diamondsuit 8\clubsuit d\clubsuit 7\diamondsuit a\spadesuit 8\clubsuit v\diamondsuit 10\clubsuit a\heartsuit a\clubsuit$, alors la seule connaissance de la couleur (noir ou rouge) de cinq cartes consécutives vous permet de savoir quelles sont ces cartes. C'est la clé du tour présenté dans l'article.

Le tableau ci-dessous permet la réalisation pratique du tour. En fonction du quintuplet de N ou R (les 32 possibilités sont indiquées dans la colonne de gauche), il vous indique les cinq cartes dont il s'agit.

NNNNN	9♠	r♣	d♣	r♠	10♣
NNNNR	r♣	d♣	r♠	10♣	r♦
NNNRN	7♠	a♠	8♣	v♦	10♠
NNNRR	d♣	r♠	10♣	r♦	8♥
NNRRN	8♠	d♠	7♦	7♠	a♠
NNRRR	a♠	8♣	v♦	10♠	a♥
NNRRR	9♣	7♠	d♦	10♥	9♠
NNRRR	r♠	10♣	r♦	8♥	a♦
NRNNN	d♠	7♦	7♠	a♠	8♣
NRNNR	v♠	v♥	9♣	7♣	d♦
NRNNR	8♣	v♦	10♠	a♥	a♣
NRNNR	10♠	a♥	a♣	8♦	9♥
NRRNN	7♣	d♦	10♥	9♠	r♣
NRRNR	v♣	d♥	9♦	v♠	v♥
NRRRN	10♣	r♦	8♥	a♦	8♠
NRRRR	a♣	8♦	9♥	r♥	7♥
RNNNN	10♥	9♠	r♣	d♣	r♠
RNNNR	7♦	7♠	a♠	8♣	v♦
RNNNR	a♦	8♠	d♠	7♦	7♠
RNNRR	v♥	9♣	7♣	d♦	10♥
RNRNN	9♦	v♠	v♥	9♠	7♣
RNRNR	v♦	10♠	a♥	a♣	8♦
RNRNR	10♦	v♣	d♥	9♦	v♠
RNRRR	a♥	a♣	8♦	9♥	r♥
RRNNN	d♦	10♥	9♠	r♣	d♣
RRNNR	8♥	a♦	8♠	d♠	7♦
RRNNR	d♥	9♦	v♠	v♥	9♠
RRNNR	7♥	10♦	v♣	d♥	9♦
RRRNN	r♦	8♥	a♦	8♠	d♠
RRRNR	r♥	7♥	10♦	v♣	d♥
RRRRN	9♥	r♥	7♥	10♦	v♣
RRRRR	8♦	9♥	r♥	7♥	10♦

2. Un algorithme calculant une suite de de Bruijn

La méthode des graphes de de Bruijn permet de trouver toutes les suites de de Bruijn et rend même possible leur décompte. Parfois cependant, on ne veut qu'une seule suite de de Bruijn. L'« algorithme gourmand » le permet. Nous l'expliquons pour $n = 4$. On part de la suite 0000, ensuite on ajoute un 1 si cela ne conduit pas à avoir un quadruplet déjà obtenu, sinon on ajoute un 0, et on recommence en n'ajoutant de 0 que lorsque c'est inévitable.

Départ :	0000
On ajoute un 1 :	00001
On ajoute un 1 :	000011
On ajoute un 1 :	0000111
On ajoute un 1 :	00001111
On ajoute un 0 :	000011110 (car ajouter un 1 donnerait le quadruplet 1111 déjà obtenu)
On ajoute un 1 :	0000111101
On ajoute un 1 :	00001111011
On ajoute un 0 :	000011110110 (car ajouter un 1 donnerait le quadruplet 0111 déjà obtenu)
On ajoute un 0 :	0000111101100 (car ajouter un 1 donnerait le quadruplet 1101 déjà obtenu)
On ajoute un 1 :	00001111011001
On ajoute un 0 :	000011110110010 (car ajouter un 1 donnerait le quadruplet 0011 déjà obtenu)
On ajoute un 0 :	0000111101100101

Ce qui donne la suite de de Bruijn d'ordre 4 :

0000111101100101

Que cette méthode fonctionne n'est en rien évident, mais c'est le cas (pour tout n), comme l'a démontré M. A. Martin en 1934.

32 symboles R ou N, on choisit un rangement des 32 cartes du jeu qui la respecte. Un grand nombre de classements conviendraient, mais on en prend un et on n'en change plus. Par exemple : 8♦ 9♥ r♥ 7♥ 10♦ v♠ d♥ 9♦ v♠ v♥ 9♣ 7♣ d♦ 10♥ 9♠ r♣ d♣ r♠ 10♣ r♦ 8♥ a♦ 8♠ d♠ 7♦ 7♠ a♠ 8♠ v♦ 10♠ a♥ a♠.

Selon l'endroit où le premier spectateur fait sa coupe, les cinq cartes qui viennent (et qui sont celles des cinq spectateurs) déterminent une suite de rouges et de noires qui permet au magicien de savoir où la coupe a été faite, et qui lui indique les cartes aux mains des spectateurs.

Traisons l'exemple utilisé pour présenter le tour. Les joueurs 1 et 3 avaient des cartes noires. La situation des cinq joueurs était donc NRNR. La seule coupe produisant cette série est celle qui amène le 10 de pique au-dessus : 10♠ a♥ a♠ 8♦ 9♥ r♥ 7♥ 10♦ v♠ d♥ 9♦ v♠ v♥ 9♣ 7♣ d♦ 10♥ 9♠ r♣ d♣ r♠ 10♣ r♦ 8♥ a♦ 8♠ d♠ 7♦ 7♠ a♠ 8♠ v♦. Les cinq cartes sont donc 10♠, a♥, a♠, 8♦, 9♥.

Sur un plan pratique, le magicien pourrait apprendre par cœur l'ordre des cartes qu'il a choisi et mentalement retrouver l'endroit de la coupe. Ce n'est pas très facile, aussi il

3. Graphes et suites de de Bruijn pour $n = 2, 3, 4, 5$

Les graphes de Nicolaas de Bruijn permettent de trouver des suites de longueur n donnant toutes les combinaisons possibles de n chiffres 0 ou 1 quand on déplace sur la suite une fenêtre de largeur n . De telles suites de 0 et de 1 sont nommées « suites de de Bruijn d'ordre n ».

Trouver ces suites est équivalent à rechercher des circuits eulériens sur un graphe, c'est-à-dire des chemins revenant à leur point de départ et passant par chaque arc du graphe une fois et une seule. De chaque sommet partent deux arcs et en arrivent deux. Cela assure que pour chaque n , un tel circuit eulérien est possible. Pour tout n , il existe donc des suites de de Bruijn.

Pour $n = 3$, le circuit eulérien 11-11-10-01-10-00-00-01 donne (en ne retenant que le premier bit de chaque paire) la suite de de Bruijn 11101000. Quand on déplace une

fenêtre de largeur 3 sur la suite (dont on suppose qu'elle se referme circulairement sur elle-même), on obtient tous les triplets possibles de 0 et de 1 :

11101000 → triplet 111 ; 11101000 → triplet 110
11101000 → triplet 101 ; 11101000 → triplet 010
11101000 → triplet 100 ; 11101000 → triplet 000
11101000 → triplet 001 ; 11101000 → triplet 011

Le graphe correspondant à cette suite est représenté dans le texte à la page suivante.

Voici une suite de de Bruijn d'ordre 4 :

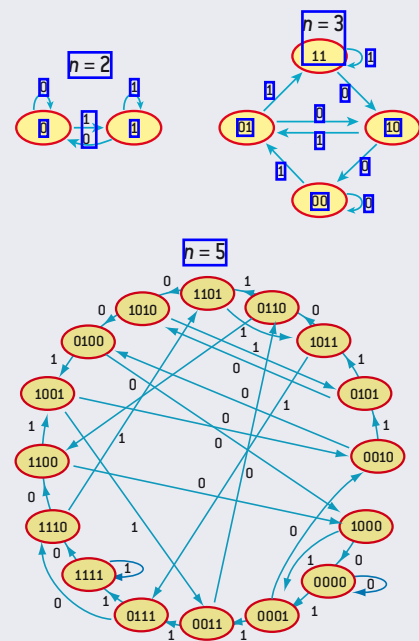
0000110010111101

En voici une d'ordre 5 (utilisée dans l'article pour le tour de magie et dont le circuit eulérien est représenté ci-contre) :

000001001010011111000010110101.

Et en voici une d'ordre 6 (dont le graphe n'est pas représenté) :

0000001000101111101110101000111100110010010101001110000101101.



4. Le problème des suites de de Bruijn en dimension 2

En dimension 2, le problème des suites de de Bruijn devient celui des tores de de Bruijn. Pour $n = 2$, il existe 16 carrés 2×2 composés de 0 et de 1 (a).

La question est : peut-on

remplir de 0 et de 1 un carré 4×4 représentant la surface d'un tore (les bords haut et bas sont collés, les bords droit et gauche sont collés) de telle façon qu'en faisant glisser une

petite fenêtre carrée de taille 2×2 sur les 16 positions possibles qu'elle peut prendre, on trouve les 16 carrés 2×2 énumérés ci-dessous ? Une solution est figurée en b.

Si à la place de deux symboles, on en considère quatre, il y a cette fois $4^4 = 256$ carrés possibles de taille 2×2 , et on peut donc (au mieux) espérer utiliser la surface carrée d'un tore 16×16 pour énumérer

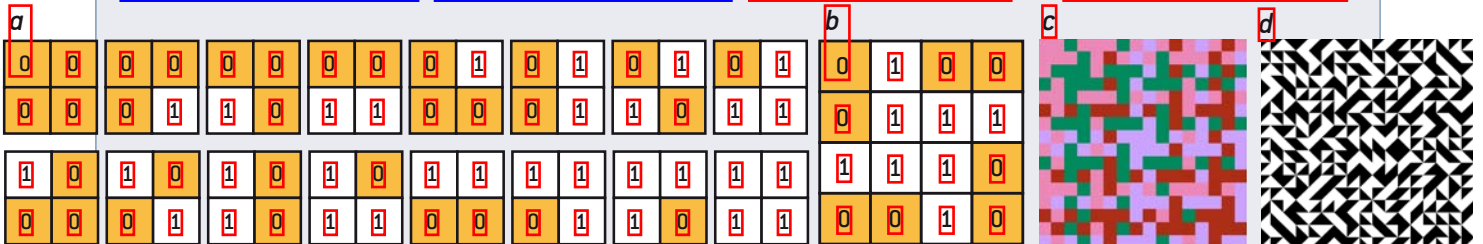
par fenêtre glissante tous les carrés possibles de taille 2×2 utilisant quatre symboles. Une solution, figurée en couleurs, est le schéma c.

Si, à la place de quatre couleurs, on utilise les quatre façons de colorier un carré en noir et blanc en le divisant par une diagonale, on obtient un intéressant tableau abstrait (d).

Un tel pavage de surface a un intérêt pratique. Un robot se

déplaçant à la surface d'une pièce où ce motif serait dessiné pourrait, en observant uniquement les quatre carrés placés sous lui et en utilisant une table convenable (comme le magicien avec son tableau caché), savoir où il se trouve précisément.

Pour d'autres informations sur cette variante du problème de de Bruijn, voir : <http://tiny.cc/9y96fx>



s'aidera d'un petit tableau (voir l'encadré 1) qui contient les réponses. Il le placera discrètement en un endroit où lui seul peut le voir, sur un petit carton qu'il a en main ou collé sur le revers de sa veste, ou sur un des objets utilisés pour son spectacle.

Un graphe pour tout comprendre

Reste une question : comment trouver les suites de Nicolaas de Bruijn ?

La suite utilisée est celle-ci :

RRRRRRRRRRNNRRNNNNNNRRRRNNNNRRNN.

Ramenons-nous à des bits d'information en remplaçant les N par des 1 et les R par des 0 : 00000100101100111110001101110101. Comment trouver une telle suite binaire, ou en trouver d'autres, permettant de généraliser le tour avec, par exemple, six spectateurs et un jeu de 64 cartes ?

L'idée repose sur une représentation en graphe du problème. Elle va nous conduire à une solution générale qui prouvera que les suites de de Bruijn existent pour tout ordre n . Il est plus simple d'expliquer la méthode avec

un jeu de seulement 16 cartes (on ne retient par exemple que les cœurs et les piques) et quatre spectateurs : les couleurs des cartes des quatre spectateurs dont prend connaissance le magicien fournissent maintenant 4 bits d'information au magicien ; cela lui permet de retrouver la coupe faite dans le jeu de 16 cartes, elle aussi est déterminée par 4 bits d'information.

Le graphe ci-contre permet de trouver toutes les suites de de Bruijn d'ordre 4. Il est composé de huit sommets qui sont les huit triplets possibles de 0 et de 1. On a tracé systématiquement un arc partant du triplet abc vers le triplet bcd (les deux derniers symboles de abc sont identiques aux deux premiers symboles de bcd). On a écrit d sur l'arc qui joint abc à bcd . Cette façon de dessiner le graphe assure que de chaque sommet partent exactement deux arcs, et que sur chaque sommet arrivent exactement deux arcs. Il y a en tout 16 arcs.

Si l'on considère un chemin suivant une série de flèches liées et passant d'un sommet à un autre, on construit une suite finie de 0 et de 1. Par exemple, en partant du sommet 110 en haut, on passe à 100, puis à 001, puis à 011, puis à 110. À un tel chemin, on fait correspondre une notation compactée, ici 1100110, obtenue en notant les uns derrière les autres les noms des sommets, sans répéter les deux symboles communs à deux sommets consécutifs (en bleu) : 110-100-001-011-110 → 1100110.

Trouver une suite de de Bruijn d'ordre 4 consiste maintenant à trouver un chemin revenant à son point de départ (un « circuit ») qui passe par tous les arcs une fois et une fois seulement. Un tel circuit passe deux fois par chaque sommet du graphe, puisque de chaque sommet partent deux arcs. Un tel circuit donne une suite de de Bruijn, car si on écrit la notation compactée du circuit, on y trouvera tous les

5. Les graphes de de Bruijn pour l'assemblage des génomes

Les séquenceurs d'ADN produisent de nombreuses petites séquences extraites de la longue séquence de quatre lettres A, G, C, T à laquelle on s'intéresse (un gène, un chromosome, etc.). Les petites séquences ont des parties communes qui déterminent leur assemblage correct. Une petite séquence

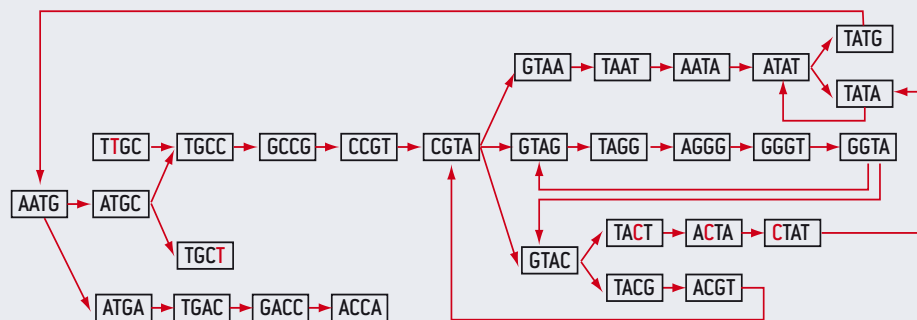
peut parfois s'assembler avec plusieurs, et on est donc face à un énorme puzzle : toutes les petites séquences produites par les machines doivent être utilisées, afin de ne déterminer qu'une seule grande séquence.

Depuis les travaux de Pavel Pevzner, Haixu Tang et Michael Waterman, les méthodes utili-

sées pour traiter ces énormes problèmes combinatoires sont fondées sur la recherche de chemins eulériens dans des graphes analogues à ceux de l'encadré 3. Les sommets de ces graphes (dont un exemple est représenté ci-dessous) sont les séquences données par la machine et les arcs indiquent les

paires de séquences ayant une partie commune (car l'une commence par ce qui est la fin de l'autre). Mener l'assemblage se ramène à trouver un chemin eulérien dans le graphe.

Le problème est rendu encore plus difficile par certaines erreurs présentes dans les résultats fournis par les machines à séquencer. Les lettres en rouge indiquent les endroits où il y a des erreurs de séquençage. La mise au point de ces algorithmes d'assemblages à base de graphes de de Bruijn fut une étape importante dans l'histoire du séquençage et aujourd'hui encore de nombreux travaux sont consacrés au perfectionnement de ces méthodes.



quadruplets possibles de 0 et de 1. En effet, le circuit passe deux fois par tout sommet (un triplet) ; une première fois, il le quitte en choisissant un 0, la seconde fois en choisissant un 1. Chaque quadruplet est obtenu une seule fois, sinon le circuit passerait deux fois par le même arc.

Donnons un exemple. Soit le circuit passant par les sommets 000-000-001-011-110-100-001-010-101-011-111-110-101-010-100. Sa notation compacte est la suite de de Bruijn d'ordre 4 notée 0000110010111101.

On vérifie qu'en prenant quatre symboles consécutifs, on obtient les 16 suites possibles de 4 symboles 0 ou 1 dans l'ordre suivant : 0000-0001-0011-0110-1100-1001-0010-0101-1011-0111-1111-1110-1101-1010-0100-1000.

La démonstration complète que, par cette méthode, on trouvera des suites de de Bruijn d'ordre n pour tout n est presque terminée. Il suffit d'évoquer un célèbre résultat de théorie des graphes dû à Leonhard Euler : **Théorème d'Euler** : Un graphe orienté possède un circuit empruntant tous les arcs une fois exactement (dénomé circuit eulérien) si et seulement si :

- il est connexe (on peut toujours joindre deux sommets en empruntant les arcs du graphe) ;
- à chaque sommet, le nombre d'arcs entrants est le même que le nombre d'arcs sortants.

Circuits eulériens

Pour les graphes considérés ici, la seconde condition du théorème est vérifiée, car de chaque sommet partent deux arcs, et en arrivent deux. Pour la première condition, il faut réfléchir un peu : partant de abc (cas $n = 3$), peut-on arriver à efg ? Oui, il suffit de suivre les arcs abc , bce , cef , efg . Pour n quelconque, l'idée s'adapte.

Les graphes de de Bruijn vérifient les conditions du théorème d'Euler. Ils ont donc tous des circuits eulériens, et donc pour tout entier n , il existe des suites de de Bruijn. Conclusion : quel que soit n , on peut faire le tour de cartes avec n spectateurs et un jeu de 2^n cartes. La méthode des circuits eulériens permet de trouver les suites de de Bruijn d'ordre n , pour tout n , et elle les donne toutes. Cela permet de les dénombrer. Il y en a exactement $2^{2^n - 1 - n}$.

Une multitude de résultats ont été démontrés concernant les suites et les

graphes de Nicolaas de Bruijn et leurs variantes. Ces résultats sont utiles par exemple en robotique (voir l'encadré 4) ou dans le domaine du traitement des séquences génétiques pour assembler les courtes séquences que les machines déchiffrent en grand nombre et qu'il faut recoller pour connaître, par exemple, la totalité d'un chromosome (voir l'encadré 5).

Le merveilleux livre *Magical Mathematics* de Persi Diaconis et Ron Graham (voir la bibliographie) consacre trois chapitres aux tours de magie fondés sur les suites de Nicolaas de Bruijn et décrit plusieurs autres applications de ces suites. On y trouve aussi des informations sur l'histoire du tour présenté au début d'article. Elle est intéressante, car elle montre qu'avant que les mathématiciens ne s'en mêlent, l'idée du tour était déjà comprise, mais n'était qu'imparfaitement mise en œuvre. La première version du tour fut exposée en 1919 par Charles Jordan, un fermier californien, éleveur de poulets, qui inventait et vendait des tours de magie. Cette première version n'était pas la meilleure possible : le magicien, qui utilisait pourtant un jeu de 32 cartes, interrogeait six spectateurs au lieu de cinq. Le rangement du jeu ne

devait donc pas suivre une suite de de Bruijn. En 1930, une version intéressante du tour est décrite par deux autres inventeurs de tours, William Larson et T. Page Wright. Cette fois, ils manipulent un jeu de 52 cartes et demandent à trois spectateurs ayant retiré trois cartes consécutives si leur carte est un cœur, un carreau, un pique ou un trèfle. Disposant d'une information de 6 bits (2 bits par réponse) le magicien retrouve la coupe faite dans le jeu de 52 cartes (qui demande 5,7 bits d'information) et aurait même pu utiliser un paquet de 64 cartes (qui aurait nécessité 6 bits d'information).

Pour mener l'analyse mathématique de cette variante du tour, il faut utiliser des suites de symboles pris dans un alphabet à 4 symboles. C'est effectivement ce que la théorie s'est attachée à traiter. Elle considère la situation générale d'un alphabet de k symboles et des séquences de longueur n . Le problème est alors de savoir s'il existe une suite de symboles (de longueur k^n) qui donne les k^n suites de n symboles possibles quand on considère n éléments consécutifs de la suite. La réponse à ce problème généralisé est à nouveau *oui*. Nicolaas de Bruijn a même su dénombrer les solutions : pour tout entier $n \geq 1$ et tout entier $k \geq 1$, il existe des suites de de Bruijn de longueur k^n , et leur nombre est exactement : $(k!)^{k^{n-1}} / k^n$.

Aide au cambrioleur

Comme application amusante des suites de de Bruijn, il y a l'ouverture d'une serrure à 4 chiffres décimaux ne comportant pas de touche « entrée » : quand les quatre derniers nombres tapés sont bons, la serrure s'ouvre. Il semble qu'une attaque par la force brute exige d'essayer 10 000 combinaisons. Si on les entre les unes après les autres par ordre croissant (0000, 0001, 0002, ..., 9999), il faut taper 40 000 fois sur le clavier. En revanche, si on utilise la bonne suite de de Bruijn, il suffira de taper 10 003 touches : les 10 000 de la suite elle-même, suivies des trois premiers chiffres de la séquence pour parcourir le cycle complet.

Parmi les nombreux résultats que les mathématiciens continuent de rechercher

et de démontrer concernant les suites de de Bruijn, citons-en deux récents.

En 2011, Veronica Becher et Pablo Ariel Heiber se sont demandé si, disposant d'une suite de de Bruijn d'ordre n sur un alphabet de k symboles, il était possible de la prolonger (en en multipliant la longueur par k) de façon à obtenir une suite de de Bruijn d'ordre $n + 1$. Ils ont établi que (a) si $k \geq 3$, la réponse est toujours *oui* ; (b) si $k = 2$, alors on ne peut jamais prolonger une suite de de Bruijn d'ordre n en une suite d'ordre $n + 1$, mais on peut toujours la prolonger en une suite d'ordre $n + 2$.

Plutôt que d'avoir une suite de 0 et de 1 qui, lorsqu'on fait glisser sur elle une fenêtre de largeur n , énumère toutes les séquences de longueur n possibles (c'est la définition d'une suite de de Bruijn d'ordre n , pour l'alphabet à deux éléments 0 et 1), on peut chercher à énumérer par la même fenêtre glissante uniquement les séquences de 0 et de 1 pas trop denses, par exemple uniquement celles contenant au plus m fois le 1. C'est la question que J. Sawada, B. Stevens, A. Williams se sont posée en 2011. Leur nombre est : $C_n^0 + C_n^1 + \dots + C_n^m$.

Il s'agit de la somme des $m + 1$ premiers éléments de la ligne $n + 1$ du triangle de Pascal. Rappelons que le coefficient $m + 1$ de la ligne $n + 1$ du triangle de Pascal (auss appelé coefficient du binôme) vaut $C_n^m = n! / (m! (n - m)!)$. Peut-on, comme dans le cas de l'énumération complète de toutes les séquences de longueur n , énumérer de la façon la plus économique possible les séquences ayant au plus m '1', c'est-à-dire en déplaçant une fenêtre de largeur n , sur une suite dont la longueur est le nombre écrit plus haut ?

La réponse, pas évidente du tout, est : oui, il existe des suites de de Bruijn pour l'énumération des séquences de longueur n et de densité au plus m .

Des versions en deux dimensions de ces problèmes d'énumération économiques ont aussi été étudiées (voir l'encadré 4) et servent en robotique. De la magie de music-hall aux difficiles problèmes combinatoires, le chemin n'est pas long, et les résultats mathématiques que l'on découvre en chemin concernent des domaines inattendus et variés, avec des applications concrètes.

L'AUTEUR



J.-P. DELAHAYE est professeur émérite à l'Université de Lille et chercheur

au Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille (LIFL).

BIBLIOGRAPHIE

M. Dow, Minimal arrays containing all sub-array combinations of symbols : De Bruijn sequences and tori, 2014 : <http://tiny.cc/9y96fx>

J. W. Klop, Nicolaas Govert de Bruijn (1918-2012) - Mathematician, computer scientist, logician, *Indagationes Mathematicae*, vol. 24, pp. 648-656, 2013.

P. Diaconis et R. Graham, *Magical Mathematics*, Princeton University Press, 2012.

J. Sawada et al., De Bruijn sequences for the binary strings with maximum density, WALCOM'11 Proceedings of the 5th international conference on WALCOM: algorithms and computation, pp. 182-190, Springer, 2011.

V. Becher et P. A. Heiber, On extending de Bruijn sequences, *Information Processing Letters*, vol. 111, pp. 930-932, 2011.

C. Flye Sainte-Marie, Solution à la question n° 48, *L'Intermédiaire des Mathématiciens*, vol. 1, pp. 107-110, 1894.



Retrouvez la rubrique Logique & calcul sur www.pourlascience.fr

SCIENCE & FICTION

Des aliens pas si rapides

Les physiciens déduisent la vitesse des dinosaures et celle des aliens des lois de la dynamique. Leur conclusion est qu'un athlète humain pourrait les distancer !

Roland LEHOUCQ et Jean-Sébastien STEYER

En cas de rencontre avec un alien belliqueux, mieux vaut se diriger immédiatement dans la direction opposée, à condition d'être sûr de pouvoir distancer la créature ! S'il est généralement possible de se faire une idée des performances d'un extraterrestre en le regardant se déplacer, ce n'est pas le cas de Sebulba, le pilote de course atrabilaire de *Star Wars* (*La menace fantôme*, épisode 1, 1999). Cet être présente une bipédie encore inconnue sur Terre : il a quatre membres munis de doigts (une caractéristique des tétrapodes), mais marche uniquement sur ses pattes avant. Cette locomotion nécessite une courbure marquée du dos et des membres antérieurs plus robustes et plus longs que les membres postérieurs. Dans le vivant terrestre, c'est en général l'inverse, si l'on en juge par les dinosaures théropodes, tel le *T-rex* aux bras réduits, ou par les oiseaux coureurs aux ailes atrophiées, telle l'autruche. Mais oublions Sebulba, et concentrons-nous sur la marche « classique ».

Le modèle bipède

La jambe peut être modélisée par une tige rigide pivotant autour de la hanche. La mécanique montre qu'il existe un pas « naturel », économe en énergie. Considérons un sujet qui marche sur une surface horizontale à vitesse constante. Quelle énergie doit-il dépenser pour maintenir sa vitesse, si l'on néglige la résistance de

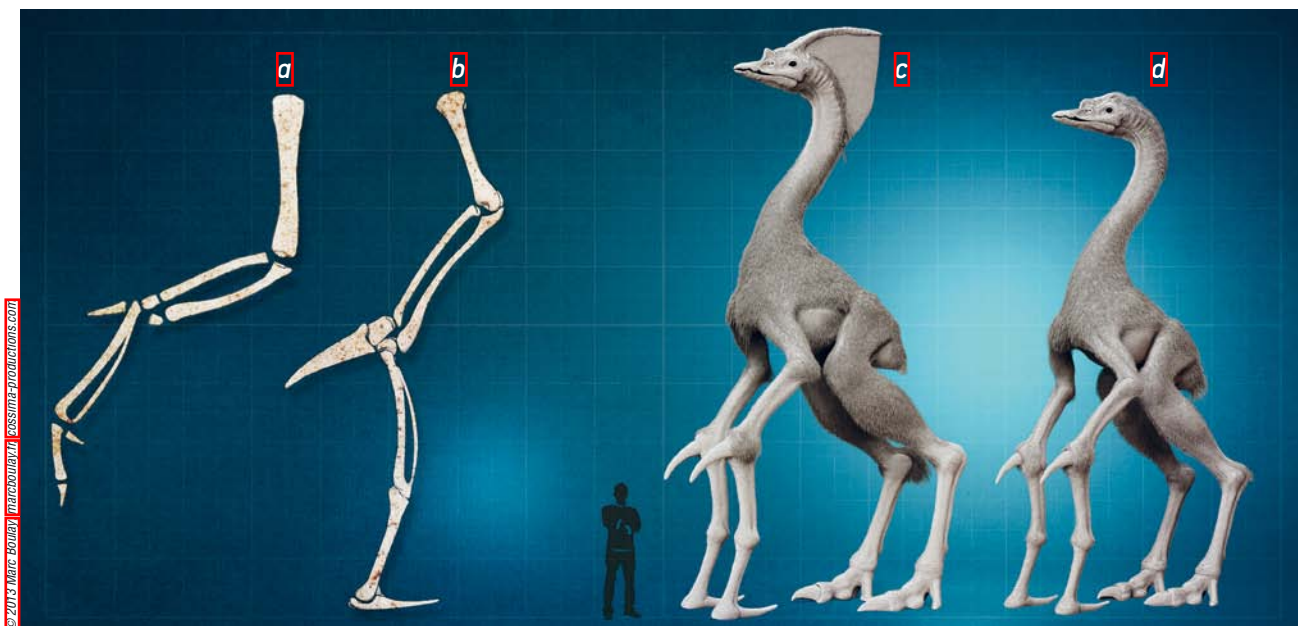


1. LE REEK, MONSTRE IMAGINAIRE de l'univers de *Star Wars*, règne sur l'arène de Géonosis. Malgré ses pattes particulièrement courtes, il court presque aussi vite qu'un rhinocéros et peut charger les jedis jetés dans l'arène.

l'air ? A chaque fois qu'un pied se pose sur le sol, il est momentanément à l'arrêt, alors que le reste du corps poursuit son déplacement. Dès lors, quand ce pied quitte le sol, il faut que toute la jambe soit accélérée vers l'avant afin de rattraper son retard. Ensuite, elle décélère jusqu'au moment où elle se pose à nouveau sur le sol. Pendant ce processus, deux ensembles de muscles antagonistes agissent successivement sur la jambe, chacun d'eux produisant un travail égal à la variation de l'énergie cinétique du membre.

De plus, la marche nécessite de se déséquilibrer vers l'avant. Quand le pied est en appui, la jambe pivote autour de la cheville et, au moment où elle bascule, la seconde jambe avance, prend le relais, et ainsi de suite. Pendant que la jambe se redresse, la vitesse de déplacement diminue et le centre de gravité du corps s'élève, atteignant sa hauteur maximale lorsque la jambe est verticale. En plus du travail nécessaire au mouvement de la jambe, les muscles doivent donc fournir aussi l'énergie gravitationnelle nécessaire à l'élévation du centre de gravité du corps entre chaque pas.

La puissance à fournir par les muscles est donc la somme de deux termes, l'un correspondant à la puissance nécessaire pour mouvoir les jambes, qui subissent une succession d'accélération et de décélération, l'autre traduisant la puissance à fournir pour vaincre la pesanteur. Si l'on allonge le pas à vitesse constante, le premier terme



2. CES GRANDS ANIMAUX IMAGINAIRES quadrupèdes et terrestres (mâle en c et femelle en d) s'inspirent des oiseaux actuels, mais les ailes de ces derniers (squelette en a) ont été transformées par l'artiste en membres antérieurs porteurs (squelette en b).

diminue alors que le second augmente. C'est l'inverse qui se produit si le pas diminue. Le pas optimal minimise la puissance totale à fournir pour se déplacer; il est proportionnel au produit de la vitesse du marcheur par la période de la jambe, considérée comme un pendule simple. On montre que la puissance dépensée est d'autant plus importante que l'on marche vite, mais aussi que l'on marche lentement, ce qui est plus inattendu. Pour une vitesse de cinq kilomètres par heure, le pas optimal mesure environ 75 centimètres pour un marcheur de taille moyenne et consomme une puissance de 250 watts.

Que faire face à un alien bipède ? Il faut estimer sa foulée pour se faire une idée de sa vitesse de déplacement. Et ne vous fiez pas à son apparence ! Prenons l'autruche : elle a l'air un peu burlesque avec sa tête redressée, et pourtant, elle se déplace deux fois plus vite qu'un être humain grâce à sa longue foulée.

L'autruche est encore plus rapide quand elle court. Quand la vitesse de la marche augmente, la force centrifuge subie par le corps qui tourne autour du pied d'appui augmente aussi. Cette force s'oppose au poids lorsque la jambe est verticale et, quand elle lui est égale, il n'y a plus d'appui au sol. On passe en régime de course. Cette transition est définie de façon formelle quand le rapport entre la force centrifuge et le poids, nommé nombre de Froude, est égal à un. Le déplacement passe alors de la marche à la course, allure pour laquelle c'est l'élasticité des muscles et des tendons des jambes qui prend le relais.

Que devient ce raisonnement si l'alien est quadrupède ? En étudiant les allures de nombreux animaux, le biologiste britannique Robert McNeil Alexander constata que la vitesse de course de deux animaux est identique quand le rapport de la longueur de la foulée à celle de la patte est le même. Il a établi une relation empirique entre la foulée et le nombre de Froude associé à la vitesse de déplacement, valable pour la plupart des animaux bipèdes et quadrupèdes. Cette relation fut d'abord utilisée pour déterminer la vitesse d'animaux disparus, tels les dinosaures non aviens.

Courtes pattes et grandes enjambées : danger !

Pour déterminer la valeur de la foulée relative, il suffit d'évaluer la longueur de la foulée à partir d'empreintes fossiles, et de déterminer la taille par le biais d'ossements fossiles ou de comparaisons adéquates. Nous montrons ainsi que nous aurions pu accompagner à la course un sauropode (herbivore à long cou et longue queue) de taille moyenne, voire un tyrannosaure ! Les calculs indiquent aussi que les sauropodes étaient vraisemblablement aussi agiles que... des éléphants.

En supposant que cette loi empirique soit universelle, la méthode sert aussi à déterminer la vitesse de course d'un alien, par exemple le Reek, féroce quadrupède à cornes lâché dans l'arène de Géonosis où les Jedis et la Princesse Amidala furent précipités par les séparatistes

(*Star Wars, L'Attaque des clones*, 2002). En comparant la bête à la taille des personnages, on peut estimer que la longueur de sa foulée est de l'ordre de quatre mètres, et celle de ses avant-bras de un mètre. D'après la loi empirique évoquée, sa vitesse de course serait voisine d'une trentaine de kilomètres par heure. Le Reek court donc un peu moins vite qu'un rhinocéros, et un très bon athlète humain pourrait le distancer.

Certains biologistes, s'ils ne remettent pas en cause la formule de R. McNeil Alexander, doutent de la pertinence de son utilisation pour les dinosaures (que dire alors des extraterrestres !), car la biomécanique de leur squelette était assez particulière. Il en résulte que leur vitesse réelle était sans doute inférieure à celle d'un mammifère de taille équivalente. Évidemment, pour les aliens marcheurs ou coureurs à plus de quatre pattes, il existe d'autres modèles, inspirés, par exemple, de ceux qui s'appliquent aux hexapodes, un groupe – bien réel – comprenant les insectes, les collemboles et d'autres petits organismes du sol : mais plus le nombre de pattes augmente, plus la coordination est périlleuse et plus les calculs sont complexes ! Quoi qu'il en soit, si vous pouvez espérer distancer un alien à la course, méfiez-vous de ceux qui, malgré de courtes pattes, font de grandes enjambées ! ■

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

ART & SCIENCE

L'ADN fait bonne figure

À partir de traces d'ADN recueillies dans la rue, une artiste reconstitue le visage de ceux qui les ont abandonnées. La ressemblance avec les originaux s'améliorera grâce aux récents progrès de la génétique : l'ère de portraits-robots à partir de l'ADN s'ouvre.

Loïc MANGIN

Prenez n'importe quelle rue : mégots de cigarettes, chewing-gums usagés, voire cheveux en jonchant inmanquablement les trottoirs... Comme n'importe qui, vous ressentez de l'indifférence ou, au mieux, pestez contre ces incivilités. Et si vous les ramassiez ? C'est ce qu'a fait l'artiste américaine Heather Dewey-Hagborg. Son idée n'était pas de se substituer aux équipes de nettoyage de la voirie, mais de faire de ces détritiques la matière première de son projet *Stranger Visions*, qui, depuis 2013, a été montré aux États-Unis, en Irlande, en Australie... La partie visible consiste en des masques très réalistes d'êtres humains (voir la figure a). Voyons comment elle s'y est prise.

D'abord, elle a apporté ses échantillons à *Genspace*, un laboratoire de biologie DIY (pour *Do it yourself*, soit Faites-le vous-même). Dans ces endroits, chacun peut s'adonner aux joies de la génétique et de la biologie moléculaire. L'artiste a extrait l'ADN et amplifié des régions connues pour varier notablement selon les individus. Rappelons que l'amplification consiste à multiplier une séquence d'ADN en un grand nombre d'exemplaires grâce à des enzymes.

L'étape suivante a consisté à séquencer les fragments d'ADN obtenus, c'est-à-dire à lire l'enchaînement de nucléotides (A, T, C et G) qui les composent. Les différences entre individus à l'endroit d'un nucléotide sont nommées SNP (*Single Nucleotide Polymorphism*). Ces séquences ont ensuite alimenté un modèle

informatique grâce auquel H. Dewey-Hagborg a pu proposer des visages (matérialisés par une imprimante 3D) de ceux qui avaient laissé par inadvertance leur ADN sur la voie publique.

Est-ce ressemblant ? Sans doute pas, car les informations utilisées ici sont peu nombreuses : couleur de la peau et des yeux, origine ethnique... L'objectif n'était pas là. L'œuvre est surtout destinée à interpeller sur la surveillance dont nous faisons tous l'objet, le respect de la vie privée, l'utilisation de l'ADN à notre insu... Cependant, le projet continue et évolue sans cesse. Et il pourrait se nourrir de récents progrès

L'œuvre est destinée à interpeller sur la surveillance, le respect de la vie privée, l'utilisation de l'ADN à notre insu...

dans la compréhension des fondements génétiques des caractéristiques du visage.

Ainsi, en 2012, Manfred Kayser et son équipe de l'Université de Rotterdam, aux Pays-Bas, ont mis en évidence, à partir de l'étude de 10 000 individus de type européen, le rôle crucial de cinq gènes dans la forme de la face : largeur du nez, taille du visage, distance interoculaire... Trois de ces gènes étaient connus pour leur implication dans des défauts du développement craniofacial. C'était un premier pas vers l'établissement d'un portrait-robot à partir d'ADN prélevé sur une scène de crime par exemple.

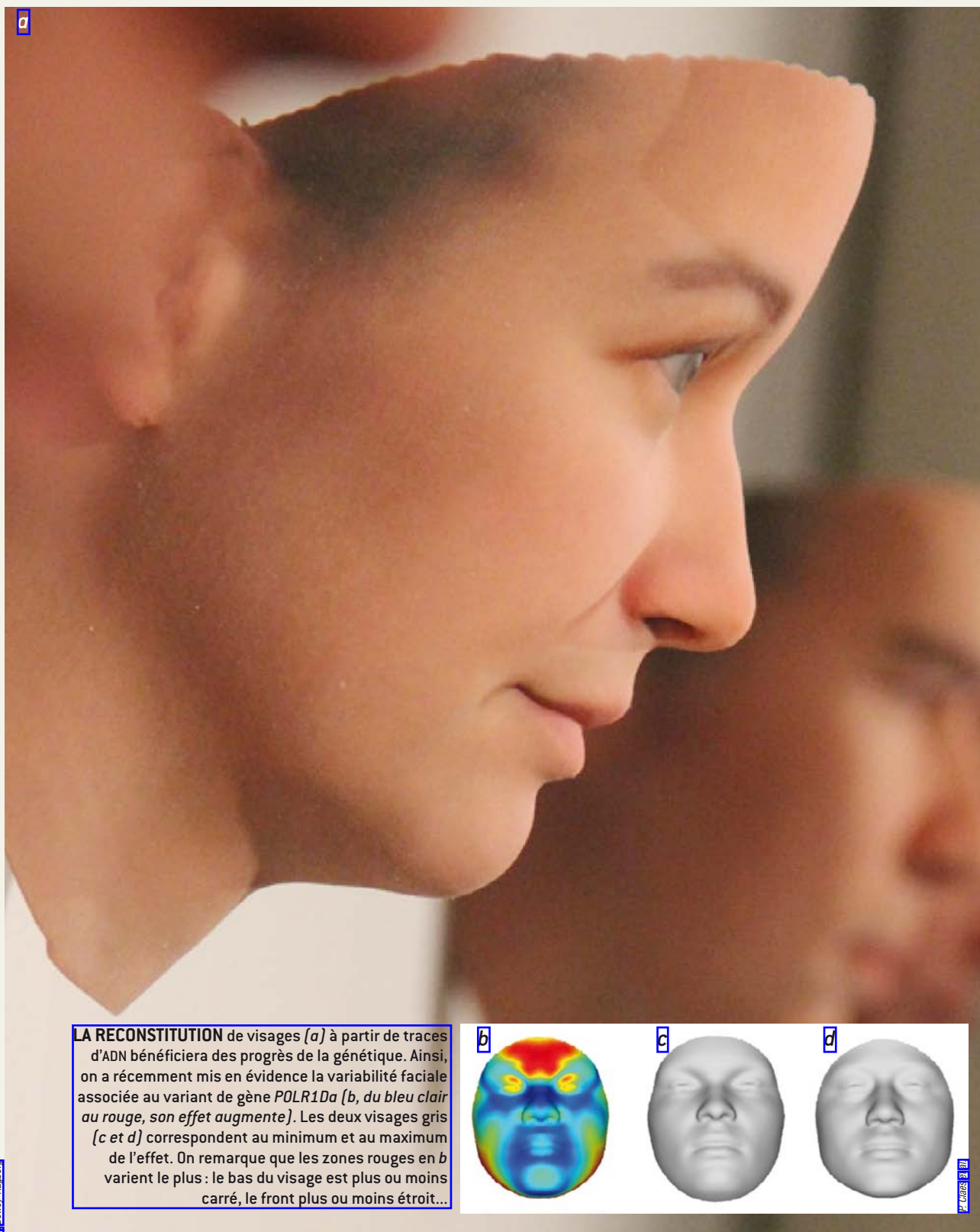
En 2014, Peter Claes, de l'Université catholique de Louvain, en Belgique, Mark Shriver, de l'Université Penn State, aux États-Unis, et leurs collègues ont annoncé avoir identifié une vingtaine de nouveaux gènes qui participeraient à la morphologie faciale. Pour ce faire, ils ont exploité des images à haute résolution des visages de 592 individus d'origine mixte (Europe et Afrique de l'Ouest) vivant aux États-Unis, au Brésil et au Cap Vert. Ces images ont été posées sur une grille numérique de plus de 7 000 points grâce à laquelle on met en évidence, en certains de ces points, les variations d'un individu donné par rapport à une moyenne.

Dans un second temps, les biologistes se sont intéressés aux génomes des individus et y ont mis au jour les SNP qui pouvaient expliquer les variations (voir la figure en bas). Au total, ce sont 24 SNP dans 20 gènes qui ont été repérés. Enfin, ils ont développé un programme qui propose un modèle tridimensionnel d'un visage à partir d'une séquence d'ADN. Exactement ce que fait H. Dewey-Hagborg !

La prochaine fois que vous jetterez un mégot ou un chewing-gum dans la rue, vous y réfléchirez peut-être à deux fois ! Et en plus, la municipalité vous en saura gré. ■

P. Claes et al., *Modeling 3D facial shape from DNA*, *PLoS Genetics*, vol. 10(3), e1004224, 2014.

F. Liu et al., *A genome-wide association study identifies five loci influencing facial morphology in Europeans*, *PLoS Genetics*, vol. 8(9), e1002932, 2012.



IDÉES DE PHYSIQUE

Le réfrigérateur qui transpire

L'évaporation de l'eau à travers un matériau poreux est à la base de dispositifs réfrigérants simples et efficaces.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Par une chaude journée d'été, quel bonheur de se désaltérer avec une gorgée de boisson fraîche ! Nul besoin de glaçon ou de réfrigérateur : le traditionnel *botijo* espagnol, en terre cuite non émaillée, conserve son contenu à une température inférieure de plus de dix degrés à la température ambiante. Pourquoi un tel dispositif, dont le principe a inspiré en Afrique un réfrigérateur rudimentaire constitué d'une double jarre, est-il aussi efficace ?

fine à l'énergie cinétique associée à l'agitation thermique des molécules : ces dernières ralentissent et la température baisse.

Ce processus est particulièrement efficace. Ainsi, l'énergie nécessaire pour évaporer un gramme d'eau liquide, aussi nommée chaleur latente de vaporisation, est de 2 250 joules, alors qu'il ne faut que 4,18 joules pour élever sa température de un degré ! Cette évaporation contribue à réguler la température de notre corps lorsque

nous avons trop chaud (voir la figure 1). Par exemple, lors d'un effort physique continu (à vélo !), nous déployons une puissance mécanique de l'ordre de 300 watts, mais une puissance thermique de un kilowatt. L'évaporation d'un litre d'eau par sudation permet d'évacuer la chaleur produite par l'organisme pendant 38 minutes : sans ce processus, la température corporelle grimperait de plus de 5 °C !

Se refroidir en transpirant

Le principe du *botijo* s'énonce brièvement : la surface de ce cruchon est humide car l'eau traverse l'argile poreuse, et c'est l'évaporation de cette humidité qui refroidit le récipient. On peut toutefois se poser des questions sur les détails de ce processus.

Commençons par l'origine du refroidissement dû à l'évaporation. L'eau liquide est un état condensé de la matière où chaque molécule est au contact de ses voisines. Dans un gaz, en revanche, les molécules sont distantes les unes des autres et interagissent peu.

Passer de la phase liquide à la phase gazeuse requiert donc de l'énergie afin de briser les liaisons entre molécules, qui assurent la cohésion du liquide. En l'absence de source d'énergie extérieure (une plaque chauffante, un four, etc.), cette énergie est prélevée in-



1. LA TRANSPIRATION aide le corps à se refroidir : en s'évaporant, l'eau absorbe de la chaleur, qui est ainsi évacuée hors de l'organisme. Plus l'air ambiant est sec, comme dans un sauna (*ci-dessus*), plus cette évaporation est intense. Dans un hammam, l'humidité de l'air réduit cette évaporation et la vapeur se recondense sur la peau et les autres surfaces.

L'efficacité dépend de l'humidité de l'air

Toutefois, l'efficacité du processus dépend beaucoup de l'humidité de l'air ambiant. En effet, dès que la teneur en vapeur d'eau atteint un certain seuil (les « 100 % d'humidité »), il y a autant de molécules d'eau de l'air qui viennent au contact du liquide et s'y incorporent que de molécules d'eau du liquide qui le quittent et rejoignent l'air ambiant.

Dans cette situation dite d'air saturé en vapeur d'eau, le flux de condensation et le flux d'évaporation s'équilibrent, et il en est de même pour les flux d'énergie. Aucun refroidissement n'est alors possible. En revanche, plus l'air ambiant est sec, plus l'évaporation et le refroidissement associé sont favorisés.

L'humidité fait ainsi toute la différence entre le sauna et le hammam. Dans un sauna, on peut supporter un air à 95 °C parce qu'il est sec (dix pour cent d'humidité) et parce que la sueur s'évapore alors facilement.

Dans un hammam, avec de l'air saturé, nous transpirons bien, mais en l'absence d'évaporation, qui évacuerait la chaleur du corps, la température ne peut guère y excéder les 50 °C.

Détailons le processus d'évaporation dans un récipient. Pour simplifier, supposons que l'air ambiant soit parfaitement sec.

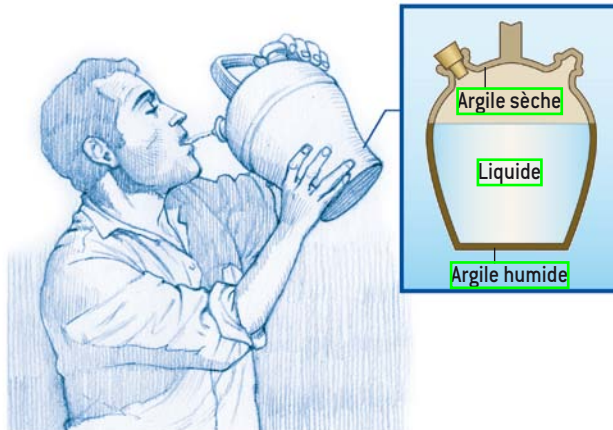
Certaines molécules à la surface de l'eau quittent le liquide. Dans le vide, elles s'éloigneraient définitivement de la surface et la quantité d'eau évaporée par unité de temps serait élevée et constante. Mais dans l'air, elles subissent de nombreuses collisions (plusieurs milliards de fois par seconde !) avec les molécules d'azote et d'oxygène qui le composent. Ces collisions modifient sans cesse la vitesse et la direction des molécules d'eau et les empêchent de s'éloigner rapidement. Elles diffusent donc lentement à partir de l'interface liquide-gaz.

Cette diffusion lente a pour conséquence une accumulation des molécules d'eau : la concentration en vapeur d'eau augmente peu à peu avec le temps, jusqu'à atteindre la saturation.

L'évaporation et le refroidissement qui lui est associé cessent-ils alors ? La diffusion réduit l'évaporation des molécules d'eau, mais elle ne la supprime pas, puisque l'air plus distant reste non saturé. S'ajoute en outre la convection, c'est-à-dire des déplacements de l'air ambiant (vent, courants d'air, etc.) qui peuvent chasser la vapeur d'eau proche de la surface et ainsi renforcer l'évaporation.

Faut-il en conclure que la baisse de température devrait se poursuivre indéfiniment ? Non, car il y a aussi des transferts thermiques : si la température de l'eau liquide devient inférieure à celle de l'air ambiant, il apparaît un flux de chaleur dans le sens inverse, qui tend dans notre cas à réchauffer l'eau. Comme les échanges de matière, ces échanges de chaleur sont tributaires des phénomènes de diffusion et de convection.

Dans l'air, les vitesses des échanges de matière et de chaleur sont comparables. On obtient alors une situation stationnaire où le refroidissement dû à l'évaporation est compensé par l'arrivée de la chaleur, le liquide étant à une température inférieure à celle de son environnement.



2. LE BOTIJO est un cruchon espagnol en argile poreuse. Comme pour d'autres récipients du même type, le liquide qu'il contient est à une température inférieure d'une dizaine de degrés à la température ambiante. Le liquide pénètre dans l'argile poreuse et atteint la surface du récipient, où il s'évapore. Cette évaporation, via la chaleur latente qu'elle nécessite, refroidit le récipient et son contenu.

Dans le cas d'une bouteille ordinaire en verre, la convection est peu efficace, car ce récipient est fermé par un étroit goulot tandis que le transfert thermique est élevé à travers toute la surface de la bouteille, le verre étant un bon conducteur thermique. S'il y a bien évaporation, elle est très faible (on peut laisser une bouteille remplie à l'air libre pour le constater) et le refroidissement insignifiant.

Le botijo : évaporation à travers l'argile poreuse

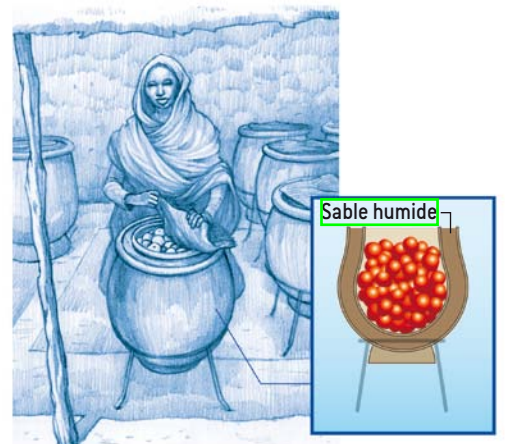
Pourquoi le refroidissement est-il si efficace dans le *botijo* ou la *zahato*, la gourde en peau des bergers basques, ou encore l'amphore antique ? Le *botijo* est un récipient en argile poreuse (voir la figure 2). L'argile est un bon isolant thermique lorsqu'elle est sèche. C'est le cas pour sa partie située au-dessus du niveau du liquide. Au-dessous, en revanche, la porosité de l'argile laisse l'eau s'infiltrer jusqu'à la surface du récipient, ce qui a deux effets.

Le premier est négatif : en envahissant les pores, l'eau, bon conducteur thermique, se substitue à l'air et l'effet d'isolation de l'argile sèche est partiellement perdu. Le

LES AUTEURS



Jean-Michel COURTU et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>



3. UN ENSEIGNANT NIGÉRIAN a conçu en 1995 un réfrigérateur rudimentaire fondé sur l'évaporation. L'espace entre deux jarres emboîtées est rempli de sable maintenu humide. L'évaporation à travers la surface extérieure conduit au refroidissement du dispositif, qui peut contenir diverses denrées solides. Un linge humide sert de couvercle, qui contribue lui aussi à la réfrigération.

BIBLIOGRAPHIE

J. Taine *et al.*,
Transferts thermiques,
Dunod (5^e édition), 2014.

N. M. Nahar *et al.*, Performance
of different passive techniques
for cooling of buildings
in arid regions,
Building and Environment,
vol. 38(1), pp. 109-116, 2003.



Retrouvez la rubrique
Idées de physique sur
www.pourlascience.fr

second est positif, car l'eau peut s'évaporer – et refroidir ainsi le contenu liquide – à travers toute la surface de la bouteille et non plus seulement à travers la surface libre du liquide. Il en est de même pour la convection, qui n'est plus limitée par l'étroitesse du goulot.

Par ailleurs, quelle que soit la hauteur de liquide dans le récipient, les échanges de chaleur et l'évaporation se produisent sur une même surface. Si cette surface diminue de moitié, les échanges thermiques et les échanges de matière sont tout deux réduits de moitié, si bien que la boisson garde une température constante, même si le niveau a baissé. En pratique, on atteint 10 à 15 degrés de moins que la température ambiante. Le prix à payer est évidemment une évaporation d'une partie du liquide, mais cette perte est modeste :

il faut environ une trentaine de jours pour que tout le liquide s'évapore.

Le *botijo*, qui permet seulement de refroidir un liquide, a inspiré un Nigérian nommé Mohammed Bah Abba (1964-2010). Vers 1995, cet enseignant a conçu un « réfrigérateur » fondé sur le même principe et qui permet, sans électricité, d'améliorer la conservation des aliments dans son pays.

L'idée ? Du sable humide est placé entre deux jarres de terre cuite emboîtées (voir la figure 3). Tant que le sable est maintenu humide, la température intérieure correspond à celle du liquide du *botijo*. Certes, la température n'est pas celle d'un réfrigérateur électrique (à 4 °C). Mais, dans des contrées dépourvues d'électricité et au climat chaud, une quinzaine de degrés en moins aide à conserver des aliments ou des médicaments sensibles à la chaleur.

france culture

LA MARCHE DES SCIENCES

Découvertes, inventions, aventures savantes au fil de l'Histoire

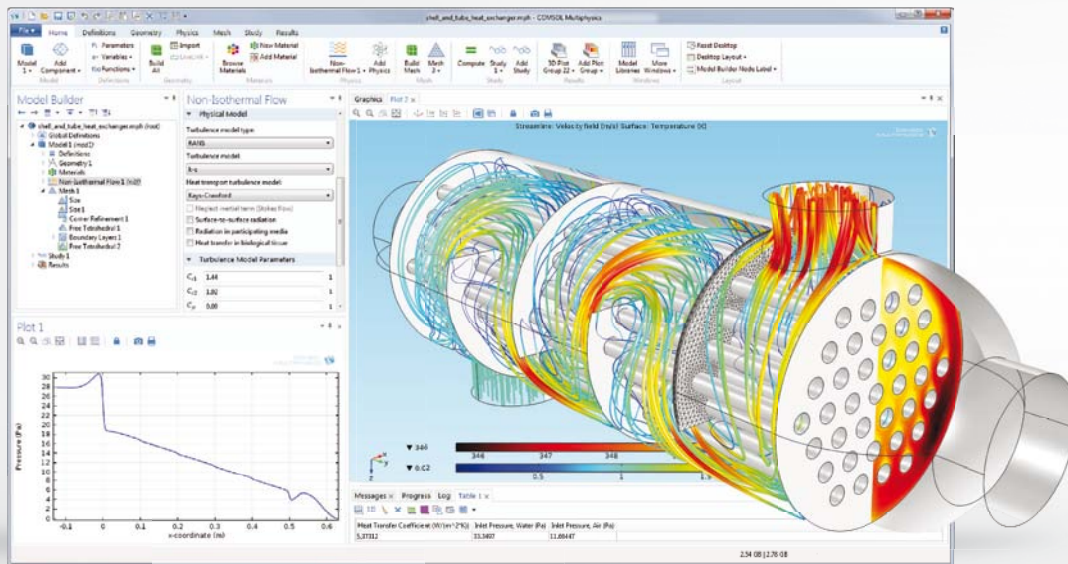
Aurélie Luneau
14h-15h / chaque jeudi

franceculture.fr

SCIENCE

Journée 2014. Photo : Marc Durand. © Philippe Bessière. Couverture : Jeanne Yvonne. ADAP. Paris 2013.

ÉCHANGEUR DE CHALEUR: Modèle d'échangeur tube calandre permettant l'échange de chaleur entre eau (tube) et air (calandre).



TESTEZ ET OPTIMISEZ VOS DESIGNS AVEC

COMSOL MULTIPHYSICS®

Nos outils de simulation multiphysique intègrent tous les effets physiques du monde réel. De ce fait, ils reproduisent avec précision le comportement de vos designs. Pour en savoir plus sur COMSOL Multiphysics, rendez-vous sur www.comsol.fr/introvideo

Product Suite

COMSOL Multiphysics

ELECTRICAL

AC/DC Module
RF Module
Wave Optics Module
MEMS Module
Plasma Module
Semiconductor Module

MECHANICAL

Heat Transfer Module
Structural Mechanics Module
Nonlinear Structural Materials Module
Geomechanics Module
Fatigue Module
Multibody Dynamics Module
Acoustics Module

FLUID

CFD Module
Mixer Module
Microfluidics Module
Subsurface Flow Module
Pipe Flow Module
Molecular Flow Module

CHEMICAL

Chemical Reaction Engineering Module
Batteries & Fuel Cells Module
Electrodeposition Module
Corrosion Module
Electrochemistry Module

MULTIPURPOSE

Optimization Module
Material Library
Particle Tracing Module

INTERFACING

LiveLink™ for MATLAB®
LiveLink™ for Excel®
CAD Import Module
ECAD Import Module
LiveLink™ for SolidWorks®
LiveLink™ for SpaceClaim®
LiveLink™ for Inventor®
LiveLink™ for AutoCAD®
LiveLink™ for Creo™ Parametric
LiveLink™ for Pro/ENGINEER®
LiveLink™ for Solid Edge®
File Import for CATIA® V5



QUESTION AUX EXPERTS

Percevons-nous des informations à notre insu ?

Oui. Seule une petite partie des informations perçues par le cerveau parviennent à la conscience.

Sylvie CHOKRON



Dans les années 1950, James Vicary, chercheur américain en marketing, a développé le concept de publicités subliminales. Ces publicités, diffusées trop vite pour que le spectateur en prenne conscience, sont censées influencer le comportement d'achat. Percevons-nous réellement des informations de façon inconsciente ? Si oui, comment le cerveau les exploite-t-il ?

À chaque instant, le cerveau reçoit une énorme quantité d'informations. Des milliers de données lui parviennent, portant par exemple sur le rythme cardiaque, la température du corps, la sensation du sol sous les pieds ou le contact de la peau avec les vêtements. Ces données captées par les sens n'atteignent pas la conscience, car des mécanismes d'attention les filtrent au profit d'informations plus pertinentes : par exemple, la perception des lettres composant ce texte pendant que vous le lisez.

D'autres facteurs peuvent empêcher l'accès des données sensorielles à la conscience. C'est le cas, par exemple, quand elles se situent au-dessous des seuils de perception (cas des images subliminales). En outre, nous ne pouvons prendre conscience que des informations que nous avons appris à voir. Ainsi, l'impression que la vision consciente est rapide, automatique et innée est trompeuse. L'image présentée à droite du titre illustre la façon dont ce qu'on s'attend à voir influe sur ce qu'on perçoit dans les données visuelles brutes : on peut y voir un bouquet

de fleurs, ou les profils de Napoléon (*en haut à droite, la feuille figurant le chapeau*), de Marie-Louise d'Autriche (*en face à gauche*) et de leur fils (*au centre*).

Que deviennent les données qui ne suscitent pas une prise de conscience ? En 2014, Joseph Sanguinetti, de l'Université de l'Arizona, et ses collègues ont présenté à des sujets des motifs dont les bordures ressemblaient à des formes familières (telle bouquet), tout en effectuant des mesures d'électroencéphalographie (mesure des signaux électriques à la surface du crâne). Ils ont détecté une activité cérébrale caractéristique d'une reconnaissance des formes, alors que les sujets déclaraient ne pas avoir vu celles cachées dans le motif. Le cerveau peut donc reconnaître des formes familières dans une scène sans que le sujet en ait conscience.

Des perceptions traitées de façon rudimentaire

Comme beaucoup d'autres du même type, ce protocole expérimental révèle des traitements non conscients, qui garantissent peut-être l'efficacité et la rapidité des processus d'analyse visuelle. Cependant, ces traitements semblent assez rudimentaires. Les perceptions non conscientes sont utiles pour nous alerter : quelqu'un qui marche dans la rue, perdu dans ses pensées, reste capable d'éviter les obstacles, sans pour autant être conscient de leur nature (on retrouve ce phénomène chez certains

patients souffrant d'un trouble visuel après une lésion cérébrale). La perception non consciente ne paraît permettre ni un jugement sémantique élaboré ni une mémorisation à long terme.

Par conséquent, même si des publicitaires diffusaient des images subliminales, l'influence sur les comportements d'achat serait probablement limitée : le traitement cognitif effectué ne permettrait ni la reconnaissance d'une marque ni sa mémorisation. L'influence des perceptions non conscientes est toutefois débattue. Certains travaux montrent que l'on peut augmenter l'envie de boire par un affichage subliminal de mots liés à la soif. Autre exemple, une étude publiée en 2013 par l'équipe de Didier Courbet, de l'Université de Marseille, suggère que les publicités affichées sur Internet influent sur les intentions d'achat, même quand on n'a pas conscience de les avoir vues. De fait, les spécialistes en neuromarketing tentent d'exploiter les informations perçues de façon non consciente.

Les travaux à venir préciseront les traitements non conscients et leur lien avec les processus attentionnels, mnésiques et la prise de décision. Les neuroscientifiques doivent dès maintenant se préparer aux questions éthiques que posera l'utilisation de ces connaissances. ■

Sylvie CHOKRON dirige l'Unité fonctionnelle vision et cognition (Fondation Adolphe de Rothschild) et l'équipe Perception, action et développement cognitif (CNRS), à Paris.

SCIENCE & GASTRONOMIE

Goûts thermiques en bouche

Et si la biologie de l'évolution aidait à cuisiner ? Des études sur les récepteurs des piquants et des températures précisent la « trousse à outils » culinaires.

Hervé THIS



Pour beaucoup d'entre nous, le café doit être brûlant, ou glacé : pour quoi ? Un sandwich ne fait pas un bon repas chaud : pourquoi ? Le piment est apprécié, et il chauffe la bouche : pourquoi ? Enfin, on dit que Dieu vomit les tièdes : l'idée est métaphorique, mais pourquoi la tiédeur est-elle ainsi honnie ?

On sait depuis longtemps que les animaux ont des températures préférées ; l'organisme, doté de thermorécepteurs, évite les milieux dont la température est inappropriée à son maintien dans un état de bon fonctionnement. Toutefois les études des dernières années étaient contradictoires : pour la mouche du vinaigre (la drosophile), certains biologistes avaient trouvé des capteurs internes, et d'autres des capteurs périphériques. Lesquels commandent les comportements de recherche de températures préférées ?

Lina Ni, Paul Garrity et leurs collègues de l'Université Brandeis, aux États-Unis, viennent de montrer que plusieurs systèmes agissent simultanément... et que des récepteurs participant à la sensation du goût interviennent aussi dans la réaction.

Initialement, cette équipe avait découvert que la protéine Trpa1 agit, de façon interne, sur les préférences des mouches soumises à un faible gradient de température. Elle vient de montrer que la réaction rapide de mouches exposées à un gradient plus prononcé (environ cinq degrés par centimètre) ne nécessite pas ce récepteur ; c'est le récepteur gustatif

Gr28b qui gouverne le comportement, par des thermocapteurs périphériques.

L'étude a notamment nécessité la production d'animaux génétiquement modifiés, dont on mesure l'expression de gènes spécifiques, l'activité électrique de neurones reliés à des récepteurs identifiés moléculairement (le plus souvent, les récepteurs sont des protéines, codées par les gènes)... Pour étudier les réactions des mouches, celles-ci étaient collées à des plaques de verre, sans être nourries, puis on leur présentait des solutions à différentes températures, afin d'étudier l'extension du proboscis, l'appendice de succion qui porte les récepteurs du goût...

On savait que les récepteurs gustatifs sont codés par une grande famille de gènes intervenant dans l'olfaction et la gustation, notamment chez des espèces qui disséminent les maladies en recherchant des hôtes thermorégulés (par exemple, nos 37 °C) : mouches tsé-tsé, moustiques... On n'avait toutefois pas compris que ces récepteurs servent à la thermoréception.

Les biologistes ont d'abord découvert que, *in vitro*, les gènes Gr28b, qui codent des récepteurs de composés amers, de composés odorants de l'alimentation, du dioxyde de carbone... rendent thermosensibles diverses cellules. Puis, en créant des mouches génétiquement modifiées, exprimant ou non les divers récepteurs codés par les gènes Trpa1 et Gr28b, ils ont découvert la superposition de la gustation et de la thermoréception. Évidemment, nous ne sommes pas des mouches,

mais la présence de thermorécepteurs dans la bouche, peut-être héritée d'un stade évolutif ancien, reste bien établie.

Que peut faire le cuisinier d'une telle donnée ? Il peut créer des contrastes, par exemple en juxtaposant dans l'assiette du très froid et du très chaud, ou, moins brutalement, du froid (un consommé de petits pois) et du très froid (une quenelle de sorbet de menthe), ou encore du tiède et du brûlant (une croquette de morue, sortie brûlante de l'huile, avec un cœur moins chaud que la coque externe).

D'ailleurs, on observera que, pour l'espèce humaine, les récepteurs Trpa1 sont plutôt liés au nerf trijumeau qu'au système sapitif : ce nerf qui vient de l'arrière du crâne reconnaît tant les températures que les frais et les piquants. Une connaissance essentielle pour ceux qui, suivant le bon précepte du cuisinier alsacien Émile Jung, cherchent à construire les mets en y plaçant « une partie de violence, trois parties de force, neuf parties de douceur ».



Hervé THIS est physico-chimiste dans le Groupe INRA-AgroParisTech de gastronomie moléculaire, et directeur scientifique de la Fondation science & culture alimentaire (Académie des sciences).



Retrouvez la rubrique Science & gastronomie sur www.pourlascience.fr

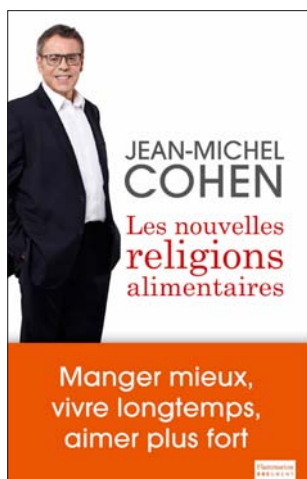
NUTRITION

Les nouvelles religions alimentaires

Jean-Marie COHEN

Flammarion, 2014
(304 pages, 19,90 euros).

Dans nos pays, l'industrie agroalimentaire joue un rôle vital. Sans elle, il n'y aurait guère d'autosuffisance alimentaire. Pour autant, elle inspire une profonde peur, et de cette peur sont nées des myriades de « religions alimentaires ». Le livre de Jean-Michel Cohen a le mérite de poser clairement la question de la légitimité de ces croyances fondées sur des idées



souvent irrationnelles, qui frisent mysticisme et idéologie collective.

Aujourd'hui, l'avantage d'être assuré de manger à sa faim se paie souvent par une trop grande uniformisation, qui inquiète le consommateur soucieux de santé et de « naturalité ». La crise de confiance qui en résulte est alimentée par de nombreuses rumeurs sur les risques liés à l'alimentation moderne, qui entretiennent l'idée qu'il faudrait se méfier de tout. C'est ainsi qu'naissent des interdits portés par la rumeur : non à la viande, non au lait, non au gluten, non à la nourriture industrielle,

etc. Mémoire courte étant donné que le temps des famines n'est pas si lointain ? Crise d'enfants gâtés ? Manger est devenu pour beaucoup une véritable religion où le prosélytisme, grâce à Internet, ne connaît pas de limites. Des églises sectaires, le plus souvent concurrentes, y cohabitent.

Cars si manger est un acte fondamental et vital d'épanouissement de l'individu dans la société, se restreindre en certains nutriments, modifier radicalement son comportement, contrarier sa culture, c'est vouloir se distinguer en se mettant « à part ». Est-ce légitime et bien raisonnable ?

Dans ce livre, l'auteur reprend quelques poncifs à la mode sur les pratiques alimentaires « alternatives » et tente d'en analyser les motivations, les éventuelles justifications et les perversions sous-jacentes : suppression du lait, néophobie du gluten, végétarisme et pratique du jeûne, crudivores, fructivores, instinctivores et autres oligovores. Pour beaucoup, le Moloch est tapi dans chaque bouchée et explique peu ou prou le succès médiatique et de librairie de tous les régimes qui font florès.

Certes, s'interroger sur le « mieux manger » est légitime, même si les réponses proposées frisent parfois l'arnaque. Chacun tente d'apporter sa réponse... Mais aux zélotes du n'importe quoi, tous dotés de réponses décisives, les pouvoirs publics et les professionnels devraient répondre de façon cohérente et satisfaisante, afin de redonner du sens à l'acte alimentaire.

C'est cette idée que développe l'auteur dans la deuxième partie de son ouvrage. Dans le désir commun du mieux vivre plus longtemps, l'état actuel des connaissances dans les grands domaines de la nutrition est passé en revue : rôle des huiles et des graisses, rôle de l'obésité, du sport,

influence du sucre, du *bio*, des addictions alimentaires... Au total, manger sans contrainte idéologique est d'abord l'expression de l'estime de soi et de l'amour des autres. Se respecter, c'est d'abord s'affranchir de ces nombreux dictons. Lier l'alimentation au plaisir partagé est contradictoire avec toute exclusive.

Bernard Schmitt
CERNh - Lorient

ZOOLOGIE

Animaux disparus

Errol Fuller

Delachaux & Niestlé, 2014
(254 pages, 25 euros).

L'idée de ce livre vient d'une constatation de son auteur : les photos d'animaux aujourd'hui éteints exercent un effet différent de celui provoqué par des dessins ou des peintures, si réussis soient-ils. Un vieux cliché en noir et blanc suscite un intérêt spécial, peut-être parce qu'il a une véracité que n'a pas une « vue d'artiste », si précise soit-elle.

L'auteur est donc parti à la recherche de photographies montrant des oiseaux et des mammifères appartenant à des espèces disparues. Les plus anciennes remontent aux années 1860. La plupart des clichés du XIX^e siècle ont été pris dans des zoos, l'équi-

pement d'alors ne se prêtant guère à la photographie de spécimens dans la nature. Les photos les plus récentes, en couleur, ne remontent qu'à quelques années, et rappellent que l'extinction des espèces reste un phénomène bien actuel, en dépit des efforts de protection.

Vingt-huit espèces sont ainsi présentées, illustrées de photos dont la qualité est très variable (certaines, comme celles du pic impérial, sont complètement floues, mais n'en sont pas moins le seul témoignage photographique connu sur l'espèce en question). Pour chaque cas, un texte concis relate les circonstances dans lesquelles les prises de vues ont été faites et explique les raisons probables de l'extinction.

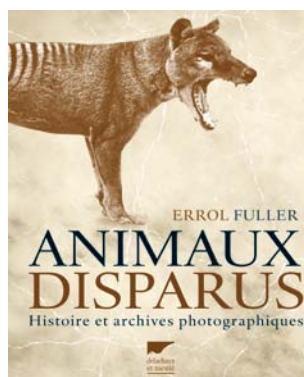
Très souvent l'homme est en cause, *via* la chasse excessive, la destruction des habitats, la guerre (la campagne du Pacifique de 1941 à 1945 a sonné le glas de nombreux oiseaux insulaires). Les maladies ont parfois joué un rôle : le paludisme aviaire a fait des ravages chez les oiseaux endémiques des îles Hawaï.

Certaines photos récentes soulignent combien le temps écoulé entre la découverte d'une espèce et son extinction peut être bref : le po'ouli masqué, oiseau de l'île Maui, répertorié en 1973, semble avoir disparu dès 2004.

Dans de rares cas, le doute peut subsister : l'espèce existerait-elle encore dans des lieux reculés ? On l'a pensé même pour des animaux relativement grands, comme le thylacine, le célèbre « tigre de Tasmanie ». Le propos n'est certes pas réjouissant, mais l'auteur se garde à juste titre de toute indignation et de tout sentimentalisme. Le témoignage des clichés rassemblés dans ce remarquable livre n'en est que plus accablant.

Eric Buffetaut

CNRS-Laboratoire de géologie,
École normale supérieure, Paris



■ PROSPECTIVE

Exquise planète

P. Bordage, J.-P. Demoule,
R. Lehoucq et J.-S. Steyer

Odile Jacob, 2014
(176 pages, 19,90 euros).

Le cadre: une exoplanète située aux confins de la galaxie, à 32 000 années-lumière de la nôtre. Un soleil, deux lunes. Une alternance jour/nuit correspondant à environ 38 jours terrestres. Quatre auteurs y jouent le jeu surréaliste du «cadavre exquis»: un astrophysicien (R. Lehoucq), un paléontologue (J.-S. Steyer), un archéologue (J.-P. Demoule) et un auteur de science-fiction (P. Bordage) écrivent tour à tour un chapitre sur la géographie, la biologie, l'histoire et ses péripéties. Quelles espèces hasard et évolution vont-ils produire? Et pour quelles aventures?

Les chapitres de ce quatuor s'enchaînent avec continuité, mais



bien sûr aussi quelques variations de style. Un peu comme une sonate. L'ensemble se lit agréablement, le développement de la vie dans le second mouvement est très enlevé et passionnant à suivre. Cette fiction d'une autre réalisation du hasard du vivant est palpitante. Il n'est difficile de dévoiler plus la suite ou trop de détails sans compromettre le plaisir d'une future lecture. Cepen-

dant, je garantis qu'il s'agit d'un livre agréable qui permettra de se changer les idées lors d'une soirée d'été passée en compagnie de notre unique lune en train de se lever.

Pierre Bertrand

Université Blaise Pascal,
Clermont-Ferrand

■ PHILOSOPHIE DES SCIENCES

La réalité physique

Alain Séguy-Duclot

Hermann, 2013
(466 pages, 35 euros).

Voici un livre au titre promoteur mais sur lequel on s'interroge aussitôt, car de nos jours (et cela fait près d'un siècle que cela dure) la jonction de ces deux mots, physique et réalité, n'est pas toujours bien vue, tant s'en faut. La faute à la physique quantique, certes, dont la réalité des objets paraît évanescence (du moins à notre regard, par rapport à notre niveau). La faute aussi à une conception traditionnelle de l'ontologie, ou théorie de l'«être», et à l'idée communément répandue que l'«être» et la «réalité» (ou le «réel») seraient équivalents.

Ces doutes s'enracinent bien plus tôt dans l'histoire de la pensée, sous les dénominations de scepticisme, voire de positivisme. La copieuse introduction de l'ouvrage, en quatre chapitres, nous place d'emblée dans cette problématique, où l'ontologie et les sciences physiques anciennes et classiques se questionnent mutuellement au long de l'histoire des connaissances (à travers des notions comme celle de vide dans son rapport au non-être, de matière, de masse, d'énergie, de force, d'irréversibilité et d'entropie...). Comme on le sait, la physique n'a pas résolu la question de savoir ce qu'est l'être. Mais la

philosophie, qui accompagnait la science depuis ses premières formulations sur l'Être et sur la Raison, ne l'a pas non plus résolue. Sans compter que la science a progressé depuis.

Sur ce fond de tableau ainsi brossé, qui continue selon l'auteur à marquer les pensées, et dont d'ailleurs la critique ne cesse de le guider, un parcours nous est proposé. Riche et en général bien informé, il nous guide à travers les



grands chemins empruntés par les diverses sortes de connaissance au XX^e siècle et jusqu'à aujourd'hui. Des parcours qui ont modifié profondément le contenu et la portée des sciences physiques. Ces directions ou perspectives (qui font les trois parties du livre) s'agencent et même s'emboîtent pour nous faire parvenir à une vue de la «réalité» bien différente de la vue «traditionnelle».

Les deux premières parties («Aléatoire, probabilités et hasard», suivies de «Désordre et émergence»), portent surtout sur les acquis de la théorie des probabilités, de la théorie de l'information et des sciences des systèmes complexes, tandis que la troisième, qui s'appuie sur les développements de la physique quantique, aboutit à ce que l'auteur dénomme l'«Émergence de la réalité». Mais c'est une réalité relative, «pour nous».



La transition néolithique en Méditerranée

Cl. Manen, Th. Perrin
et J. Guilaine (dir.)

Errance, 2014
(464 pages, 59 euros).

Les contributeurs d'un colloque qui eut lieu en 2010 à Toulouse rendent compte de leurs recherches sur le passage de la prédation à la production en Méditerranée. Est traitée d'abord la mutation vers le Néolithique au Proche-Orient, sa diffusion vers Chypre, l'Égée et l'Adriatique, puis ce qui nous concerne plus particulièrement: la néolithisation de l'Ouest méditerranéen, et en particulier la propagation de la culture du Cardial depuis le Sud italien jusqu'à l'Ibérie. Le tout en un volume!



La Presqu'île au nucléaire

Françoise Zonabend

Odile Jacob, 2014
(241 pages, 23,90 euros).

Le déni du risque nucléaire régnerait dans la presqu'île du Cotentin, entend démontrer l'auteure, anthropologue à l'EHESS. Cela tiendrait au fait que, pour pouvoir vivre avec les risques, on les nie. Ce déni pousse à ignorer par exemple que les bâtiments conçus pour l'industrie nucléaire dans les années 1950 ne seraient jamais construits ainsi aujourd'hui, en cette époque de terrorisme, ou encore à refuser le débat politique sur la question nucléaire. Or, selon l'auteure, le même genre de déni a préparé Fukushima.



Femmes de sciences de l'Antiquité au XIX^e siècle

Adeline Gargam (dir.)

Éd. Universitaires de Dijon, 2014
(345 pages, 22 euros).

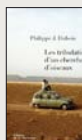
«Il ne manque aux femmes que les occasions de s'instruire [...] On en voit assez qui se distinguent malgré les obstacles [...]», écrivait le grand astronome Jérôme de Lalande (1732-1807). Et quels obstacles! Les biographies d'Hypatie, des femmes médecins de l'Antiquité, de la physicienne Émilie du Châtelet et d'autres femmes savantes, de l'anatomiste Anna Morandi Manzolini, de l'encyclopédiste féministe Clémence Royer, etc. illustrent avec force la hardiesse des savantes du passé, et montrent aussi le soutien qu'elles reçurent de certains grands esprits masculins.



Le monde selon Étienne Klein

Étienne Klein
Éditions des Équateurs, 2014
(284 pages, 15 euros).

Le jeudi matin, sur *France Culture*, Étienne Klein fait, pendant six minutes, le pari d'intéresser le public à la physique. Ce livre réunit les chroniques diffusées de septembre 2012 à mars 2014. Familier dans l'expression, mais rigoureux dans la pensée, É. Klein éclaire certains résultats connus mais mal compris du public, réfléchit aux difficiles notions de changement, de temps, d'origine, raconte des anecdotes et, bien sûr, défend et illustre les anagrammes, tant sur le plan pratique (il en propose beaucoup) que théorique : elles l'aident à expliquer la non-commutativité.



Les tribulations d'un chercheur d'oiseaux

Philippe Dubois
Éditions de la Martinière, 2014
(250 pages, 16 euros).

Si vous pensiez qu'un ornithologue passe sa journée sagement à observer des oiseaux avec une paire de jumelles au bord d'un étang, Philippe Dubois vous montrera qu'il n'en est rien. Avec beaucoup d'humour, il raconte comment son métier l'a conduit « hors des sentiers battus » à étudier les oiseaux du bout du monde, de l'Alaska à la Sibérie en passant par Ouessant. Au fil des anecdotes, on n'a qu'une envie, partager les aventures et l'émotion d'un homme qui contemple la nature.



Des vers de terre et des hommes

Marcel Bouché
Actes Sud, 2014
(325 pages, 25 euros).

En ingérant, digérant, remodelant la terre, les vers de... terre l'aèrent, la mélangent et recyclent le carbone et l'azote, bref, ils fertilisent les sols. Pourtant, rares sont les études qui leur sont consacrées, et encore plus rares celles qui les prennent en compte dans l'évolution des milieux et des écosystèmes sous l'effet des pratiques humaines. Pour pallier ce manque, l'auteur, agronome, rassemble les connaissances sur ces lombriciens et propose des pistes pour valoriser ce savoir.

Si, à chaque pas dans ce parcours, considérations scientifiques et philosophiques s'accompagnent, c'est dans les trois chapitres d'une dernière partie de « Conclusion » que l'auteur pousse encore la réflexion philosophique. Elle est ponctuée par un « Épilogue » qui proclame (en une page et demie) le « nouveau paradigme philosophique » vers lequel le parcours proposé nous a entraînés, à savoir la « nouvelle révolution théorique » destinée à remplacer la « révolution copernicienne » de la raison critique que Kant avait achevée. Ce serait une révolution de la pensée qui romprait avec le rationalisme trop simple et l'« objectivité phénoménale » trop limitée, en tenant compte de la diversité des échelles de la connaissance, qui s'étagent de l'échelle quantique à l'échelle cosmique (du moins pour ce qui concerne la physique). L'auteur la dénomme, un peu emphatiquement, « révolution d'échelle ou révolution scalaire » : ce sont là les derniers mots du livre, et ils portent un parfum d'énigme.

Au lecteur de reprendre les éléments et analyses développés dans le corps de l'ouvrage pour tenter de se faire une idée de la philosophie qu'il pourrait se former pour lui-même sur les ruines des anciennes certitudes et des anciens systèmes de pensée. L'auteur, quant à lui, fait profession d'opérationnalisme (avec Bohr) et de pragmatisme, ce qui est moins original que bien des aspects de son étude, et affaiblit à mon sens la portée de sa réflexion. C'est son droit, bien entendu, et malheureusement la place me manque ici pour en débattre comme il serait souhaitable (en réhabilitant l'exigence de rationalité dans la recherche de l'intelligibilité, et rendant toute sa signification à la pensée conceptuelle et théorique, qui seule permet de comprendre ce qu'indique l'expérience). En tout

cas, ce livre, bien écrit, intéresse et incite au débat.

Michel Paty

Laboratoire Sphere, CNRS
et Université Paris-Diderot

SCIENCES SOCIALES

Technocritiques

François Jarrige
La Découverte, 2014
(420 pages, 28 euros).

Dans cette édition augmentée d'un essai paru en 2009, l'auteur dresse une histoire détaillée des luttes contre le « monde technique », depuis le XVIII^e siècle des briseurs de machines jusqu'aux critiques de la société numérique du XXI^e siècle. Il montre que ces oppositions reposent moins sur une aversion à la nouveauté que sur une lutte face à l'ordre social et politique véhiculé par ces changements techniques. L'auteur traite de l'opposition entre ceux pour qui les techniques sont des outils neutres, dont les effets positifs ou négatifs viennent à l'usage, et ceux pour qui elles sont des instruments de domination qui configurent le champ des possibles. Il redonne de la profondeur aux luttes passées et de l'ampleur au récent retour en force des thèses critiques des technosciences.

Malgré des critiques constantes durant leur essor, les techniques ont progressivement déterminé le destin de l'industrialisation. En privilégiant toujours les techniques de réduction des coûts, de production de masse et la « mesure de l'ingénieur » plutôt qu'une production flexible, la société s'est coupée des savoir-faire corporels des ouvriers



et des artisans. Selon l'auteur, cette « marche à l'aveugle », poursuivie dans une logique capitaliste de concentration du pouvoir, est soutenue par un discours promettant des lendemains enchanteurs, qui s'opposent à une contestation peu relayée. La technologie domine nos vies, malgré les accidents et les risques qu'elle engendre, dont le premier est une détérioration irréversible de notre environnement. Dans ce mouvement, la recherche est aussi instrumentalisée : la science réduite à la recherche technologique est devenue une arme dans la compétition économique.

Ce livre rend un hommage bienvenu à la créativité des critiques du progrès technique et révèle leur multiplicité. Pour autant, l'auteur écarte bien vite ceux qui n'appartiennent pas à sa chapelle, et les relations qu'il établit entre les techniques et les aspects sociopolitiques de ce qu'il nomme un « macrosystème technique » semblent insuffisantes. Le lecteur est appelé à un bien intéressant débat.

Josquin Debaz

GSPR, EHESS, Paris

Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur www.pourlascience.fr



Actuellement
en kiosque

pourlascience.fr/dos

DOSSIER POUR LA SCIENCE

- La gravité, une illusion ?
- La matière noire : les preuves de son existence
- Les trous noirs indispensables à la vie !

On a détecté les ondes gravitationnelles du Big Bang

Le magazine thématique de l'actualité scientifique N° 83 Avril-Juin 2014

Les mystères du cosmos du Big Bang aux trous noirs

POUR LA SCIENCE - DOSSIER N° 83 - AVRIL-JUIN 2014

DOSSIER HORS-SÉRIE



France : 8,25 € - Canada /S : 11,50 CAD - Guadeloupe /S : 8,25 € - Martinique /S : 8,25 € - Guyane /S : 8,25 € - Luxembourg : 7,40 € - Maroc : 90,00 Dirhams - Martinique /S : 8,25 € - Nlle Calédonie Wallis /S : 2120 F.CFP - Nlle Calédonie Wallis /S : 1170 F.CFP - Polynésie Française /S : 2120 F.CFP - Polynésie Française /S : 1170 F.CFP - Portugal : 7,90 € - Roumanie /S : 8,25 € - Suisse : 15 CHF.

n° 83 - 120 pages - prix de vente : 6,95 €

www.pourlascience.fr

Le site de référence de l'actualité scientifique internationale



Disponible sur



LA PREUVE PAR L'ERREUR

La licorne a quatre pattes, une corne et un joli sourire.

Il n'y a aucun moyen de démentir cette phrase, vu qu'il n'existe pas de licorne. Toute affirmation à propos d'un élément de l'ensemble vide est vraie, puisque personne ne peut exhiber cet élément (il n'y en a pas dans l'ensemble vide !) et montrer qu'il la contredit.

Voilà qui va faire progresser une difficile question : les objets mathématiques existent-ils ? Le cercle parfait du géomètre ne se trouve ni dans la nature ni dans aucune construction visible. Le nombre deux n'a pas plus d'existence concrète : on peut percevoir deux arbres ou deux maisons, mais pas le nombre deux lui-même. Si l'existence d'objets élémentaires comme le cercle et le nombre deux est douteuse, celle des objets mathématiques élaborés devient carrément invraisemblable.

Et pourtant ! S'ils n'existaient pas, on ne pourrait rien dire de faux à leur sujet, pas plus qu'au sujet de la licorne. Or les mathématiciens font des erreurs. Donc les objets mathématiques existent.

Une manière irréfutable de prouver qu'on ne parle pas dans le vide, c'est de se tromper.



INTELLIGENCE GALVAUDÉE

Grâce à la technologie, on peut avoir un ventre plus plat qu'une limande tout en étant obèse. Nos ordinateurs et téléphones sont, physiquement, d'une minceur d'anorexique mais, intellectuellement, d'une obésité gargantuesque. Ils absorbent des milliards de données sans prendre un gramme.

Seulement, l'obésité intellectuelle n'est pas plus saine que l'obésité physique. Le mathématicien Laurent Schwartz (1915-2002) raconte qu'un de ses collègues avait une culture mathématique supérieure à lui et assimilait très vite. Mais cette aptitude « était, comme souvent, un obstacle à la réflexion personnelle et à la créativité » (*Un mathématicien aux prises avec le siècle*, Odile Jacob, 1997).

On va me reprocher de jouer avec les mots. Appliquer un même terme aux personnes trop grosses, aux appareils gavés d'informations, aux gens gênés par leur excès d'érudition, est admissible en tant qu'image, mais ne prouve rien. Je veux bien reconnaître mon tort. À une condition, toutefois. Que ceux qui usent et abusent du mot intelligent – maisons intelligentes, voitures intelligentes, textiles intelligents, réfrigérateurs intelligents, que sais-je encore – que ceux-là reconnaissent que, eux aussi, jouent avec les mots, et que l'intelligence des appareils technologiques n'a rien à voir ni avec l'intelligence humaine ni avec l'intelligence animale.

GRANDS HOMMES INSPIRANTS

Si vous trouvez que l'éducation coûte cher, essayez l'ignorance ». Nombreux sont ceux qui reprennent à leur compte cette déclaration attribuée à Abraham Lincoln. Et ils ne nous avancent en rien.

Ils supposent acquis le résultat d'une expérience impossible à faire. Aucune société n'est ignorante. Les diverses sociétés ont des savoirs divers. Celui qui sait montre à celui qui ne sait pas : ce geste semble partout répandu. L'être le plus fruste possède forcément un minimum de savoir-faire. L'état d'ignorance n'existe pas.

Asséner la formule de Lincoln, c'est trancher d'un air hautain une question qui ne se pose pas : nul ne conteste qu'il y a besoin de transmission entre les générations. Et c'est ne donner aucune piste pour répondre aux questions qui se posent et exigent des choix difficiles : que faut-il enseigner ? À qui ? Comment s'y prendre ?

Une éducation refrénant la propension à répéter sans examen les propos des grands hommes – voilà qui n'aurait pas de prix.



LIBERTÉ, ÉGALITÉ, FRATERNITÉ... ET SYMÉTRIE

Lorsque Hubert Reeves a donné pour titre à un livre des mots tirés d'un poème, *Patience dans l'azur*, on ne lui a pas contesté le droit d'utiliser Valéry à sa façon. Mais lorsque des philosophes emploient des termes pris aux sciences, il leur arrive d'être vertement repris par des scientifiques.

Les rapports entre croyants et athées ne sont pas non plus symétriques. Les croyants attaqués dans leur foi réagissent souvent avec plus de virulence que les athées attaqués pour leur absence de foi.

Or il n'y a pas d'égalité entre les citoyens si leurs obligations mutuelles ne sont pas symétriques les unes des autres. Donc tout projet politique égalitaire doit aspirer à la symétrie.

Hélas, le mot « symétrie » a des sens multiples. Une symétrie oblique n'est pas une symétrie droite. Une symétrie centrale, une symétrie axiale, une symétrie plane, ne sont pas à confondre et n'ont pas les mêmes propriétés – pour ne rien dire d'autres définitions, plus générales et abstraites, que les mathématiciens donnent de la symétrie. Bref, ajouter le mot « symétrie » à la devise de la République n'aidait pas celle-ci à trouver un cap. La science est trop confuse pour rendre moins confus les débats politiques. ■

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



Exercer son talent au service des autres est une mission que nous partageons. C'est pourquoi, **la GMF, 1^{er} assureur des agents des services publics** en fait toujours plus pour vous assurer dans votre vie personnelle (assurance auto, habitation, complémentaire santé, épargne) et vous accompagner dans votre vie professionnelle. À votre tour, rejoignez nos 3 millions de sociétaires pour profiter **des offres privilégiées** que nous vous réservons.

POUR LES MOINS DE 30 ANS

50€ OFFERTS*

SUR VOTRE ASSURANCE AUTO

Renseignez-vous au **0 970 809 809** (numéro non surtaxé) ou sur **www.gmf.fr**

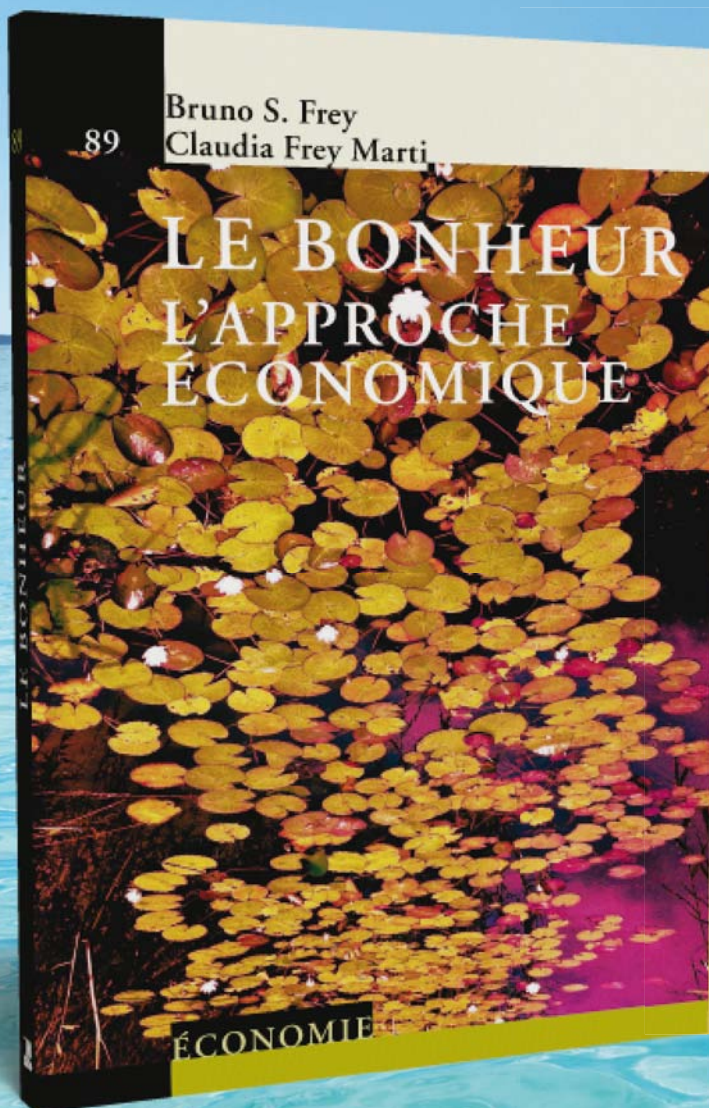
*Offre réservée aux agents des services publics de moins de 30 ans, la 1^{re} année, à la souscription d'un contrat d'assurance auto, valable jusqu'au 31/12/2014.

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

ASSURANCES MUTUELLES DE FRANCE - Société d'assurance mutuelle - Entreprise régie par le Code des assurances - R.C.S. Paris 323 562 678 - Siège social : 11, place des Cinq Martyrs du Lycée Buffon - 75014 Paris. Adresse postale : 45930 Orléans Cedex 9.

80 ans **GMF**
ASSURÉMENT humain

le bonheur, à quel prix ?



Quelle est la recette du bonheur ?

Dépend-il de notre revenu, de notre position sociale, de notre relation aux loisirs, de notre statut civil ? Ou d'autres facteurs encore ?

Pour la première fois, des économistes se penchent sur ces questions, et y répondent dans un petit ouvrage surprenant, clair et sans jargon.

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



PRESSES POLYTECHNIQUES ET UNIVERSITAIRES ROMANDES
Editeur scientifique de référence depuis 1980

www.ppur.com