

MENACES SUR LE WEB : Tim Berners-Lee, son créateur, s'inquiète

■ POUR LA SCIENCE

Juin 2011 - n° 404

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

L'anatomie du neutron

Comment suivre
le manège des quarks ?

Les hallucinogènes

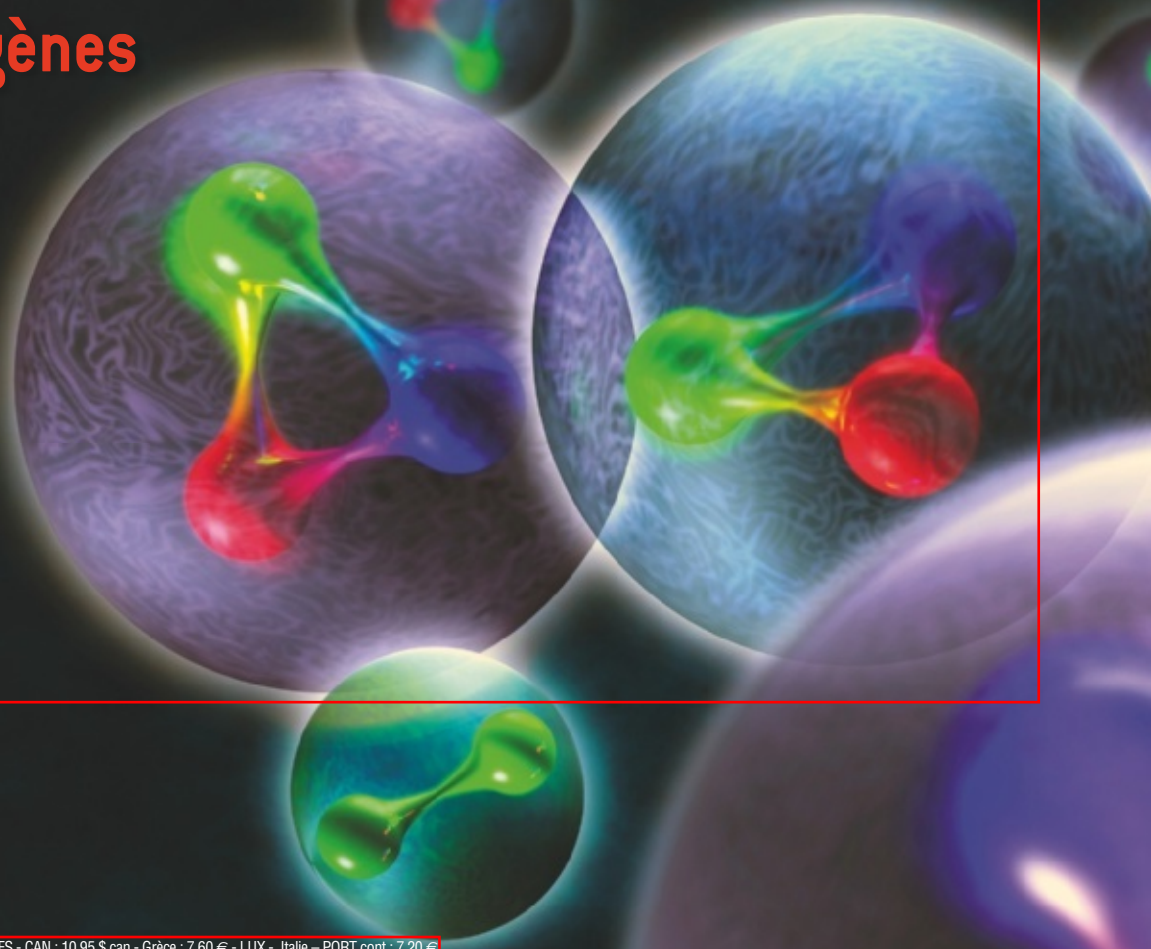
Des médicaments
pour demain ?

Les CubeSats

Des satellites
pour tous !

Les galaxies perdues

Il en manque
500 milliards



M 02687 - 404 - F: 6,20 €



France métro : 6,20 € - DOM s : 7,30 € - BEL : 7,20 € - CH : 12 FS - CAN : 10,95 \$ can - Grèce : 7,60 € - LUX - Italie - PORT cont : 7,20 €
- AND : 6,20 € - ALL : 9,30 € - MAR : 60 DH - TUN : 6,70 TND - REU av : 9,30 € - TOM surf : 980 F CFP - TOM av : 1770 F CFP

Solidarité

Engagement

Proximité

Confiance



casden



BANQUE POPULAIRE

Humaine et contemporaine
notre identité reflète
nos valeurs

Groupe POUR LA SCIENCE

Directrice de la rédaction : Françoise Pétry

Pour la Science

Rédacteur en chef : Maurice Mashaal

Rédacteurs : François Savatier, Marie-Neige Cordonnier,
Philippe Ribeau-Gésippe, Bénédicte Salthun-Lassalle,
Guillaume Frasca

Dossiers Pour la Science

Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin

Rédacteur : Guillaume Jacquemont

Cerveau & Psycho

L'Essentiel Cerveau & Psycho

Rédactrice en chef : Françoise Pétry

Rédacteur : Sébastien Bohler

Directrice artistique : Céline Lapert

Secrétariat de rédaction/Maquette : Annie Tacquenot,

Sylvie Sobelman, Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy

Site Internet : Philippe Ribeau-Gésippe assisté de Ifédayo Fadoju

Marketing : Élise Abib

Direction financière : Anne Gusdorf

Direction du personnel : Marc Laumet

Fabrication : Jérôme Jalabert assisté de Marianne Sigogne

Presse et communication : Susan Mackie

Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé

Conseillers scientifiques : Philippe Boulanger et Hervé This

Ont également participé à ce numéro :

Yehezkel Ben-Ari, Steven Bouillon, Eric Buffetaut,
Patrice Codogno, Françoise Combes, Bettina Debü, Dusko Ehrlich,
Valérie Feruglio, Peter Geltenbort, Juan González, Marc Huger,
Dave Klumppar, Ulli Koester, André Malan, Christophe Pichon,
Jean-Sébastien Real, Stéphane Schmitt, Daniel Tacquenot

PUBLICITÉ France

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin
(j.f.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

Adresse postale :

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

Commande de livres ou de magazines :

0805 655 255 (numéro vert)

DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE

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

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

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

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

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

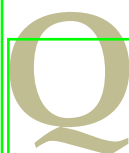
Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou
francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents conte-
nus dans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientific American »,
dans les livres édités par « Pour la Science » doivent être adressées par
écrit 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'adapt-
ation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le
nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific Ame-
rican, 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-Augus-
tins - 75006 Paris).



Représentations



Quand il ne pouvait honorer un rendez-vous, le roi d'As-
syrie faisait porter son manteau. De même, les Baby-
loniens se prosternaient devant l'habit de leur souverain.
Le vêtement avait une valeur symbolique, une valeur
de représentation. L'attention portée à sa confection,
tant par les matières utilisées que par la coupe ou encore les brode-
ries ou incrustations de pierres précieuses, témoigne d'un moment
dans l'histoire de l'homme où l'habit est passé du statut de protec-
tion contre le froid à celui de représentation du statut social de celui
qui le portait (*voir L'artisanat textile au Proche-Orient ancien, page 54*).

La représentation comble un manque. Elle sert à remplacer
quelqu'un ou quelque chose, à donner à voir l'invisible, à faire accéder
une idée à la perception et aux sens. La représentation substitue à
l'absence d'une chose une forme de présence. Cette substitution est
supposée restituer la personne ou l'objet absent, mais soulève la
question de la fiabilité de la représentation : dans quelle mesure le
représentant est-il fidèle au représenté ?

Le représentant est-il fidèle au représenté ?

Quand l'homme décide que des robots peuvent faire la guerre à
sa place, il ne conçoit pas des représentants à son image. Ces robots
militaires, utilisés en nombre depuis une dizaine d'années dans les
conflits au Moyen-Orient, changent totalement la façon de conduire
la guerre. S'ils épargnent de nombreuses vies du côté de ceux qui les
contrôlent, les robots soulèvent de nouvelles questions éthiques et
politiques (*voir La guerre des machines, page 46*).

Mais l'habit n'est pas le monarque, et le robot n'est pas le soldat. Le
représentant n'est pas réductible à celui qu'il représente. Pas plus que ne
sont équivalentes la masse de la matière ordinaire qui existe dans l'Uni-
vers et la masse des galaxies observées : il manquerait 500 milliards de
galaxies à l'appel dans notre représentation de l'Univers ! La matière serait
piégée dans d'immenses filaments de gaz chauds que l'on ne parvient
pas à détecter directement (*voir Les galaxies perdues, page 62*).

En fait, le travail des archéologues qui consiste à reconstituer les
étoffes de l'Antiquité au moyen de quelques fils de laine ou de lin plus
ou moins bien conservés n'est peut-être pas si éloigné de celui des astro-
physiciens qui recherchent, dans les filaments gazeux qui sillonnent
l'Univers, la trace de galaxies manquantes..., la trame de l'Univers ! ■

1 ÉDITO

4 BLOC-NOTES

Didier Nordon

Actualités

6 La grotte Chauvet datée par l'ours



7 L'ocytocine, antidouleur des nouveau-nés

9 Les premières étoiles avaient le tournis

12 La stabilité complexe du vélo... et bien d'autres sujets.

14 ON EN REPARLE

Opinions

16 POINT DE VUE
Coup de pouce pour la thérapie génique

Pierre Tambourin

17 ÉCONOMIE
Quand les meilleurs s'en vont

Ivar Ekeland

18 DÉVELOPPEMENT DURABLE
Gaz de schiste : un avenir à préciser

Bernard Tardieu

20 VRAI OU FAUX
Le jeûne est-il sain ?

Jean-Michel Lecerf

22 COURRIER DES LECTEURS

24 QUESTIONS OUVERTES
Longue vie au Web ?

Tim Berners-Lee

Le Web joue un rôle clef dans la révolution numérique, mais conditionne aussi notre prospérité et notre liberté. Comme la démocratie, il a besoin d'être protégé.

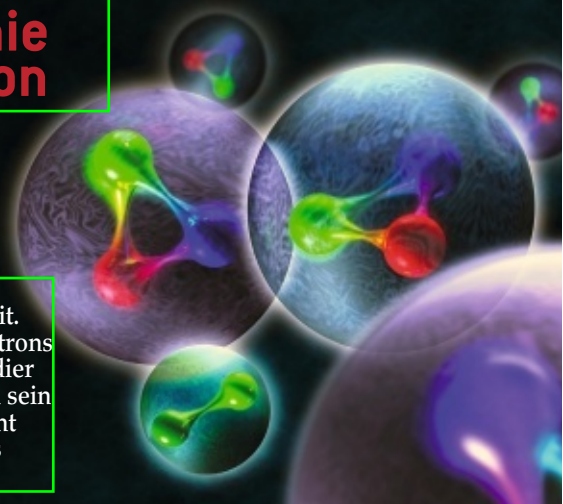
À LA UNE

30 PHYSIQUE DES PARTICULES

L'anatomie du neutron

Timothy Smith

Le neutron est plus structuré qu'on ne le pensait. Des collisions avec des électrons accélérés permettent d'étudier la répartition des quarks au sein de cette particule, et révèlent que ces charges ne sont pas distribuées uniformément.

38 ÉVOLUTION
Les surprises de l'évolution humaine

Jonathan Pritchard

De nouvelles analyses génétiques suggèrent que l'évolution récente de l'homme a suivi un cours plus lent que celui prévu par les biologistes.

46 ROBOTIQUE
La guerre des machines

Peter Singer

L'arrivée des robots sur les champs de bataille bouleverse la pratique de la guerre. Comme l'avènement des armes nucléaires, elle suscite aussi des questions d'ordre politique, juridique ou éthique.



54 **ARCHÉOLOGIE****L'artisanat textile au Proche-Orient ancien***Cécile Michel*

L'artisanat textile mésopotamien a laissé peu de traces matérielles. Néanmoins, leur étude et l'examen des textes cunéiformes révèlent l'importance de la production textile et des fonctions sociales attachées aux vêtements.

**62** **COSMOLOGIE****Les galaxies perdues***James Geach*

D'après les dernières estimations, l'Univers observable contient 200 milliards de galaxies. Pourquoi si peu?

**70** **MÉDECINE****Des hallucinogènes médicaments***Roland Griffiths et Charles Grob*

Les hallucinogènes, telle la psilocybine extraite de champignons, modifient l'humeur. Ils sont à nouveau étudiés chez l'homme, car ils pourraient diminuer l'anxiété ou soulager la douleur.

76 **TECHNOLOGIE SPATIALE****À chacun son satellite***Alex Soojung-Kim Pang et Bob Twiggs*

Grâce à de minuscules satellites standardisés, les expériences spatiales sont à la portée des équipes de recherche les plus petites.

Regards**84****HISTOIRE DES SCIENCES****L'élan de Jefferson sauve la réputation de l'Amérique***Lee Dugatkin*

Alors que les États-Unis se construisaient en tant que nation, Thomas Jefferson combattit l'image d'une Amérique dégénérée, créée par le naturaliste Buffon et ses disciples européens.

88**LOGIQUE & CALCUL****Le calculateur amnésique***Jean-Paul Delahaye*

Un calculateur sans mémoire est-il sérieusement limité? Les résultats de l'algorithmique *in situ* montrent que non: avec un peu d'astuce, il s'en sortira toujours.

94**ART & SCIENCE****L'erreur de Léonard de Vinci***Loïc Mangin***96****IDÉES DE PHYSIQUE****Vitesse de la lumière et four à micro-ondes***Jean-Michel Courty et Edouard Kierlik***100****SCIENCE & GASTRONOMIE****Cinq fruits et légumes par jour***Hervé This***102****À LIRE**

Sur la totalité des numéros:

deux encarts d'abonnement pages 24 et 25.

Encarts commande de livres et abonnement pages 76 et 77.

En couverture: Didier Florentz

Rendez-vous sur **POURLA SCIENCE.fr**

Plus d'informations

- L'intégralité de votre magazine en ligne
- Des actualités scientifiques chaque jour
- Plus de 5 ans d'archives
- L'agenda des manifestations scientifiques

Les services en ligne

- Abonnez-vous et gérez votre abonnement en ligne
- Téléchargez les articles de votre choix
- Réagissez en direct
- Consultez les offres d'emploi

www.pourlascience.fr

→ DÉCODAGE

Si on dit : « Fermez la porte », cela ne suffit pas à ce que la porte soit fermée. Alors que si un président dit : « La séance est ouverte », sa phrase est performative, c'est-à-dire suffit à ce que la séance soit ouverte ; dire équivaut là à faire. Proposons quelques phrases antiperformatives.

« Je ne vais pas vous ennuyer plus longtemps », déclare l'officiel prononçant l'allocation d'ouverture d'un congrès. Par ces mots convenus, inutiles, il ennuie les auditeurs, pressés d'entamer le congrès pour lequel ils sont là. L'officiel réalise donc en parlant le contraire de ce qu'il dit. Sa phrase est antiperformative.

« Écoutez, je vais vous parler très franchement », annonce l'homme politique. Ce tic de langage, présent chez trop de politiques, révèle que celui-ci est, comme trop de politiques, sur le point de louvoyer. Sa phrase, censée mettre en confiance, inspire la défiance. Idem, quand il clame son « souci de totale transparence » : afficher la transparence est un rideau derrière lequel on abrite des manigances. Idem, quand il déclare : « Je n'ai pas pour habitude de pratiquer la langue de bois », cette formulation relevant elle-même de la langue de bois.

« Ceci est une calomnie qui ne mérite pas que j'y réponde » est doublement antiperformatif : pareille déclaration sert toujours d'introduction à une réponse, laquelle, en outre, est toujours présentée comme « définitive », alors que les démentis alimentent les rumeurs plus souvent qu'ils ne les font taire.



Quiconque se trémousse pour séduire un public court le risque de réaliser un discours antiperformatif. Le public traduit : « S'il se démène autant pour attirer l'attention, celui-là, c'est qu'il veut obtenir plus d'applaudissements qu'il n'en vaut. » Quelle production antiperformative, alors, que ces dossiers que nous remplissons pour obtenir promotions ou subsides, dans lesquels, à longueur de colonnes et de pages, nous exagérons nos mérites, exaltons nos réalisations, idéalisons nos projets, magnifions nos entreprises, hypertrophions notre importance !

→ CADRES RIGIDES

Une maladresse, un verre tombe à terre. Les lois de la physique agissent dans leur imprévisible souveraineté : le verre rebondit et, finalement, ne se casse pas. « Coup de chance ! », s'exclame-t-on. Curieuse réaction. Comme s'il fallait de la chance pour qu'un verre reste dans l'état normal où il serait tranquillement resté s'il n'était pas tombé ! Par une réaction encore plus bizarre, celui qui sort indemne d'un accident qui aurait pu être grave dit : « J'ai eu une veine folle. » C'est de la veine, vraiment, que d'être pris dans un accident ?

En général, nous peinons beaucoup à changer de cadre conceptuel. Nous nous raccrochons à des notions familières, même si elles sont dépassées ; nous gardons nos grilles de lecture politiques malgré les bouleversements qui les rendent caduques ; nous acceptons mal les mœurs des jeunes, etc. S'adapter à l'évolution des réalités n'est pas spontané, demande un effort, et nous avons presque toujours du retard. Rien de tel en cas d'accident. En un clin d'œil, sitôt qu'il est enclenché, nous nous mettons à évaluer ses conséquences par rapport au cadre nouveau qu'il a soudain imposé. Cette promptitude à changer de référence explique les réactions étranges évoquées ci-dessus.

C'est que nous n'oublions jamais la fragilité des barrières censées nous protéger des coups du destin. Notre état normal d'hommes est d'être en butte à un monde qui nous bouscule sans cesse de toutes parts. L'accident est le cadre naturel inscrit dans la mémoire de notre espèce, et nous n'avons aucun effort à faire pour nous y replonger.

→ INACCESSIBLE ÉTOILE

Les chercheurs prodiguent volontiers des promesses de bonheur pour demain, quand leurs recherches auront abouti. Mais les promesses de bonheur ne font pas le bonheur. Pour être heureux aujourd'hui, il faut accepter à peu près les choses en leur état, ressentir un minimum d'harmonie avec ce qui est, se contenter plus ou moins de ce qu'on a. Par leur volonté de contribuer à un avenir



meilleur, les chercheurs montrent qu'ils ne sont pas satisfaits du présent. Se livrer à une recherche (scientifique, spirituelle, ou autre) peut donc être un plaisir, une passion, une lutte, un divertissement, une carrière, mais pas un bonheur.

Même effectuée dans des laboratoires ultramodernes, la recherche est la mise en œuvre d'un archaïsme : l'éternel désir de l'homme d'avoir autre chose que ce qu'il a. Gérer la recherche, c'est gérer le déséqui-

libre permanent dû à cette fièvre immémoriale qui, précisément, empêche d'être heureux. Pas étonnant que les instances chargées d'une telle mission connaissent quelques malheurs...

→ LA REVANCHE DES INCOMPRIS

En 1863, des artistes dont n'avait pas voulu le jury du Salon de Peinture et de Sculpture exposèrent leurs œuvres au Salon des Refusés. Par un retournement banal en histoire des arts, certains artistes refusés sont maintenant considérés comme majeurs, par exemple Manet.

En 2009, des scientifiques ont fait ce que les artistes avaient fait dès 1863. Une revue est née, au titre encore plus cinglant que celui de Salon des Refusés : *Rejecta Mathematica*. Une condition nécessaire pour qu'un article y soit publié est que, auparavant, il ait été rejeté par les revues à comité de lecture, ces fameuses revues qui forment l'alpha et l'oméga de la carrière universitaire. L'histoire des sciences étant à peine moins capricieuse que celle des arts, les mathématiciens réduits à publier dans *Rejecta Mathematica* conservent leurs chances de passer pour majeurs aux yeux de la postérité. Peut-être même, un jour, réalisant une de ces symétries chères aux sciences, les revues à comité de lecture n'accepteront-elles de publier un article que si, auparavant, il a été refusé par *Rejecta Mathematica* !



Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques

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

Le regard de l'ethnologue n° 26



Être migrant et Haïtien en Guyane
Maud Laëthier
Préface de Marie-José Jolivet

320 pages
ill. noir et blanc
16 x 24 cm
26 €

CTHS Histoire n° 45



La province antiquaire
L'invention de l'histoire locale
en France (1800-1870)
Odile Parsis-Barubé

464 pages
15 x 22 cm
28 €

CTHS Histoire n° 43



Hommes de la vigne et du vin
Sous la direction de Sophie Delbrel
et Bernard Gallinato-Contino

208 pages
ill. noir et blanc
15 x 22 cm
20 €

Archéologie

La grotte Chauvet datée par l'ours

La datation des plus anciennes peintures de l'humanité restait controversée. Mais l'étude génétique et la datation de restes d'ours confirment les résultats fournis par l'analyse des pigments : les peintures de la grotte Chauvet ont plus de 29 000 ans.



Les peintures de la grotte Chauvet témoignent d'un sens artistique impressionnant. Dans la galerie du Cactus, un ours des cavernes dessiné au pigment rouge est rehaussé à l'estompe (a). Les oreilles sont tracées sur un plan oblique, ce qui accentue la perspective, et l'épaule est soulignée de trois marques rouges. L'ours des cavernes est identifiable au relief marqué de son front, moins fuyant que celui de l'ours brun (*croquis en rouge*). Sur le grand panneau de la Salle du fond sont représentées, aux pigments charbonneux, des lionnes en chasse (b). Les scènes sont rares dans l'art paléolithique. Celle-ci est unique.

La grotte Chauvet fut découverte par trois spéléologues en 1994. Lorsqu'il la visita à leurs côtés, le préhistorien Jean Clottes déduisit de la finesse esthétique de ses peintures qu'elles remontaient à la culture qui a produit Lascaux, apparue il y a quelque 22 000 ans. Toutefois, le carbone 14 contenu dans les pigments charbonneux des peintures plaçait l'art pictural de la grotte à quelque 31 000 ans. Jean-Marc Elalouf, de l'Institut de biologie et technologies du CEA, et des collègues ont confirmé cette datation directe par une datation indirecte : la « datation par l'ours ».

Cavité de quelque 500 mètres de long, la grotte Chauvet contient plus de 500 œuvres qui représentent surtout des animaux dangereux, tel l'ours. Les peintures du fond de la grotte, réalisées à l'aide de pigments charbonneux, sont datables directement par le radio-carbone, contrairement aux ours rouges dessinés à l'entrée, dont les pigments sont minéraux.

Lorsque les premières datations ont indiqué que les œuvres du fond de la grotte dataient de l'Aurignacien (il y a entre 37 000 et 29 000 ans) – époque de l'arrivée en Europe des premiers hommes anatomiquement modernes –, nombre de préhistoriens sont restés sceptiques : cela impliquait qu'il existait déjà, au début du Paléolithique supérieur, des artistes maîtrisant des techniques aussi complexes que l'estompe, la perspective, le rendu des volumes ou la représentation du mouvement. Aujourd'hui, après la détermination de l'âge de plus de 50 charbons de bois provenant des pigments ou du sol, l'idée que l'essentiel des œuvres de Chauvet remonte à l'Aurignacien fait largement consensus.

Pour la confirmer, J.-M. Elalouf et son équipe ont daté la dernière visite de l'ours des cavernes (*Ursus spelaeus*) dans la grotte. Cette espèce de grande taille (3,5 mètres de haut) était végétarienne et inféodée aux forêts ; sa disparition, il y a quelque 28 000 ans, a peut-être

été précipitée par l'homme, qui lui disputait les grottes où elle hibernait. Pour Valérie Feruglio, qui a analysé les peintures rouges de la grotte, les ours dessinés présentent le crâne massif et le « stop frontal marqué » typique des ours des cavernes et non le profil frontal plus fuyant de l'ours brun. J.-M. Elalouf a étudié l'ADN d'un échantillon de restes d'ursidés de la grotte et de pièces comparables des grottes voisines, puis les a datés. Il s'agit bien d'ours des cavernes, appartenant à une population de faible diversité génétique, donc en voie de disparition. De fait, aucun ours de l'échantillon étudié n'a vécu après il y a 29 000 ans, ce qui suggère que les dessins rouges de Chauvet sont antérieurs. En outre, certaines œuvres du fond de la grotte ont été abimées par des ours se faisant les griffes, qui hibernaient donc dans la grotte après leur réalisation...

→ François Savatier

J.-M. Elalouf et al., J. of Arch. Science, en ligne, 2 avril 2011

Écologie

Plein de carbone sous les mangroves



Les mangroves stockent en moyenne cinq fois plus de carbone que les autres forêts. Daniel Donato, du Service des forêts américain, et ses collègues l'ont montré en mesurant la concentration de carbone contenu dans le sol de 25 écosystèmes de mangroves de la région Indo-Pacifique. Les mangroves se développent dans les régions tropicales, sur les côtes basses balayées par les marées ou à l'embouchure de certains fleuves. Les racines de leurs arbres ralentissent le flux des marées et favorisent ainsi la sédimentation, sous la mangrove, des particules organiques charriées par l'eau (résidus végétaux ou animaux). Les chercheurs ont noté que le carbone stocké dans ces sédiments est bien plus abondant que celui issu du cycle de décomposition des arbres et retenu dans la couche supérieure du sol – lui-même plus abondant que le carbone produit par les autres forêts. La disparition des mangroves libère le carbone piégé. Selon l'équipe de D. Donato, au rythme actuel, cela représenterait jusqu'à dix pour cent des émissions totales de dioxyde de carbone.

→ Marie-Neige Cordonnier

D. C. Donato et al., *Nature Geoscience*, vol. 4, pp. 293-297, 2011

En bref

DINOSAURES À POUX ?

Vincent Smith et ses collègues, à Londres, ont reconstitué l'arbre phylogénétique de 69 espèces de poux actuelles à partir de leur ADN et montré que les poux étaient bien diversifiés avant la limite Crétacé-Tertiaire (65 millions d'années) qui marque la fin des dinosaures. La variété des parasites reflétant celle des hôtes, ils en déduisent que la radiation des oiseaux et des mammifères aurait commencé bien avant l'extinction de masse. Et les oiseaux ayant pour ancêtres certains dinosaures à plumes, les poux infestaient peut-être déjà ces aïeux !

GALAXIES STOPPÉES

Les plus grosses galaxies ont cessé de grandir il y a sept milliards d'années. C'est ce qu'ont montré des astronomes américains, qui ont observé avec le télescope *Hubble* les BCG, des galaxies elliptiques géantes situées au centre des amas de galaxies et contenant jusqu'à 100 000 milliards de soleils. Elles sont aujourd'hui à peine 30 pour cent plus massives qu'il y a sept milliards d'années. Or selon le modèle d'accrétion, elles auraient dû tripler en taille.

TOURBILLONS PROFONDS

L'océan est-il partagé entre une surface agitée par les anticyclones et des profondeurs plus calmes ? Une équipe américaine révèle que les tourbillons de surface balayant l'océan Pacifique perturbent les eaux jusqu'à plus de 2 000 mètres de profondeur. Les courants marins qui en résultent assurent le transport de la chaleur des sources volcaniques profondes, ainsi que des mollusques qui y vivent. En témoigne la colonisation de sources sans vie, distantes de plus de 300 kilomètres.

Neurobiologie

L'ocytocine, antidouleur des nouveau-nés

Juste après sa venue au monde, le nouveau-né semble moins sensible à la douleur s'il est né par voie basse que s'il est né par césarienne, avait montré une équipe suédoise en 2008. Un groupe de neurobiologistes français, finlandais, russes et italiens piloté par l'équipe de R. Khazipov et Y. Ben-Ari, de l'Institut de neurobiologie de la Méditerranée (Inserm/Université de la Méditerranée), à Marseille, vient de mettre en évidence le mécanisme qui préserve l'enfant de la douleur à la naissance et durant quelques heures.

La naissance peut être source de douleur lorsque le fœtus est comprimé ou manque d'oxygène, ou lors de l'utilisation de forceps. Les chercheurs ont mis en évidence le rôle antidouleur, chez le nouveau-né, d'une hormone sécrétée en quantité par la mère lors de l'accouchement, l'ocytocine. Cette molécule, qui favorise la contraction de l'utérus, l'allaitement et l'attachement au nouveau-né, a un effet antalgique chez l'adulte. L'équipe marseillaise



avait précédemment montré que l'ocytocine inhibe certains neurones du cortex de fœtus de rat. Le groupe international montre à présent chez des rats qu'elle réduit la douleur du nouveau-né en bloquant l'influx nerveux véhiculé par les neurones de la douleur.

À la naissance, les douleurs trop fortes ou persistantes chez le fœtus conduisent parfois à des séquelles neurologiques. En augmentant la résistance de l'enfant

à la douleur pendant ces épisodes, l'ocytocine diminuerait le risque de telles séquelles et agirait comme un mécanisme protecteur naturel. Une donnée à prendre en compte lorsqu'un inhibiteur de l'action de l'ocytocine est administré pour ralentir l'accouchement, ou lors des césariennes programmées.

→ M.-N. C.

M. Mazzuca et al., *Frontiers in Cellular Neuroscience*, vol. 5, n° 3, 12 avril 2011

Médecine

Un vaccin antidrogue

La méthamphétamine, une drogue de synthèse euphorisante, déclenche une dépendance rapide. On pourrait peut-être y remédier. L'équipe de Kim Janda, à l'Institut Scripps en Californie, a réussi à vacciner des souris contre cette drogue : elles produisent des anticorps qui neutralisent la méthamphétamine avant qu'elle n'agisse sur le cerveau.

Les chercheurs ont synthétisé une molécule qui imite la méthamphétamine : elle a quasiment la même forme, la même charge électrique, mais ne déclenche pas les mêmes effets délétères. Cette molécule seule n'étant pas repé-

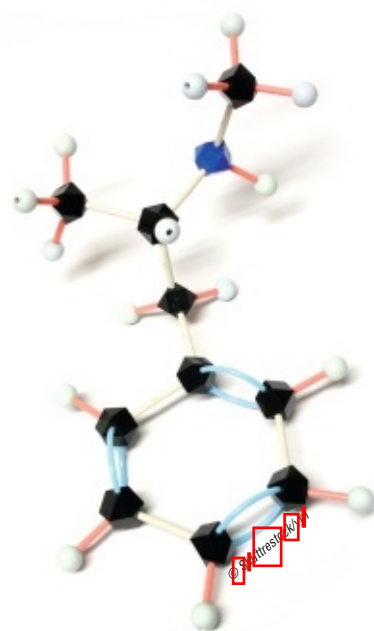
rée par le système immunitaire, les biologistes l'ont associée à une protéine auxiliaire volumineuse. Injecté chez la souris, cet assemblage est détecté par le système immunitaire, lequel déclenche la production d'anticorps spécifiques dirigés contre le complexe, et notamment contre la partie correspondant à la méthamphétamine. Lors d'une consommation ultérieure de méthamphétamine, ces anticorps qui persistent dans l'organisme reconnaissent la drogue, s'y fixent et la neutralisent.

L'efficacité du vaccin va être évaluée par des essais cliniques. Des vaccins contre la cocaïne et la nicotine, fondés sur le même prin-

cipe, sont déjà en cours d'évaluation. Selon Daniele Zullino, spécialiste des addictions à l'Hôpital universitaire de Genève, de tels vaccins constituent un traitement efficace dans le cadre d'une prévention précoce, parce qu'ils évitent que ne se mette en place le câblage neuronal de la dépendance. En revanche, pour une addiction ancienne, ils ne gommeront pas les mécanismes neuronaux déjà à l'œuvre. Mais ils éviteront sans doute que la conduite automatique de consommation de drogue ne s'aggrave.

→ Guillaume Frasca

A. Moreo et al., JACS, vol. 133 (17), pp. 6587-6595, 2011

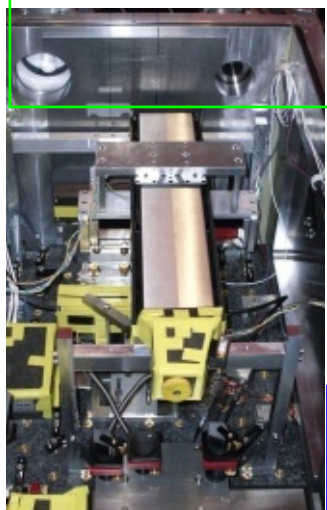


La molécule de méthamphétamine, cible du vaccin testé sur des souris.

306 BALEINES à bosse ont été repérées dans l'océan Antarctique. Un regroupement inhabituel, car le krill, aliment des cétacés, se raréfie en raison de la fonte des glaces.

Physique

Mesurer la gravité à l'échelle quantique ?



Dans ce tube à vide (au centre) mesurant un mètre de long, des neutrons sont piégés entre deux plaques distantes d'une vingtaine de micromètres.

Comment observer les effets, à l'échelle quantique, de la force de gravité terrestre ? Des physiciens de l'Université de technologie de Vienne et de l'Institut Laue-Langevin (ILL), à Grenoble, proposent une solution. Ils ont mis au point une nouvelle technique de mesure des transitions entre les états quantiques de la matière, fondée sur l'étude de l'effet d'une perturbation mécanique sur des neutrons ultrafroids.

Habituellement, ces transitions sont mesurées par spectroscopie électromagnétique : un rayon lumineux excite des atomes d'un état quantique donné, caractérisé par une certaine énergie, vers un état d'énergie supérieure, et l'on détecte par diverses techniques les énergies de transition d'un état à un autre. Ici, les mesures

portent sur des neutrons, excités par les vibrations d'un miroir.

Refroidis à quelques millikelvins, les neutrons se déplacent si lentement qu'au lieu de traverser la matière, ils interagissent avec elle et peuvent être confinés dans une enceinte. Les physiciens ont utilisé cette propriété qui, pour ces neutrons, fait de la matière un miroir.

Ils ont injecté des neutrons ultrafroids entre deux plaques horizontales distantes d'une vingtaine de micromètres. La plaque supérieure absorbe ou diffuse les neutrons d'énergie supérieure à un seuil, tandis que les neutrons d'énergie inférieure restent piégés sous l'effet de la force gravitationnelle et de l'interaction forte qu'ils subissent avec les noyaux de la plaque inférieure, le miroir. Les neutrons ainsi confinés présentent

alors des énergies discrètes. Et lorsque le miroir inférieur vibre à une certaine fréquence, ils passent d'une énergie à une autre.

Par cette technique, nommée spectroscopie de résonance gravitationnelle, des variations infimes de la force gravitationnelle pourraient être détectées. Une piste pour tester les théories liées à la gravité dans le domaine micrométrique, telles la loi de la gravitation de Newton ou l'existence d'autres dimensions prédite par la théorie des cordes. Voire détecter de nouvelles forces qui perturberaient la gravité, telle celle que pourraient engendrer les axions, ces particules hypothétiques proposées comme l'un des constituants de la matière noire.

→ M.-N. C.

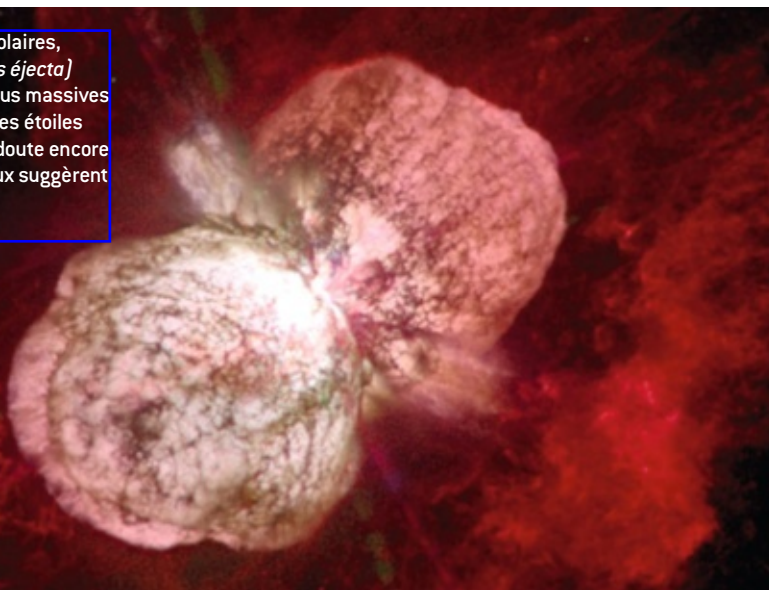
T. Jenke et al., Nature Physics, en ligne, 17 avril 2011; G. L. Greene, ibidem, 17 avril 2011

Astrophysique

Les premières étoiles avaient le tournis

La composition d'étoiles d'un amas ancien suggère que les premières étoiles de l'Univers tournaient très vite sur elles-mêmes.

Avec 100 à 150 masses solaires, Eta Carinae (au centre des éjecta) est l'une des étoiles les plus massives de la Galaxie. Les premières étoiles de l'Univers étaient sans doute encore plus massives. Des travaux suggèrent qu'elles étaient en outre en rotation ultrarapide.



NASA/ESA

En étudiant les fossiles, les paléontologues retracent la vie d'animaux qui ont vécu il y a des millions d'années. Il en est de même pour les astrophysiciens : en mesurant la composition d'étoiles parmi les plus vieilles de notre Galaxie, Cristina Chiappini, de l'Observatoire de Genève, et ses collègues ont trouvé des indices indiquant que les premières étoiles de l'Univers étaient en rotation très rapide.

Ces premières étoiles, qui se sont formées quelques centaines de millions d'années après le Big Bang, étaient des dizaines à des centaines de fois plus massives que le Soleil. Elles ont disparu depuis longtemps, mais on peut voir leur trace fossile dans les étoiles de la génération suivante.

En effet, lorsqu'une étoile massive explose, elle expulse dans l'espace interstellaire tous les éléments « lourds » (ou « métaux ») synthétisés par les réactions nucléaires au cours de sa vie. Ces éléments sont recyclés dans de nouvelles étoiles. Or les

petites étoiles pouvant vivre des milliards d'années, on peut aujourd'hui observer des étoiles de seconde génération incorporant des éléments lourds issus des premières étoiles.

L'équipe de C. Chiappini a mesuré à l'aide du *Very Large Telescope* européen, au Chili, l'abondance de deux éléments lourds, le strontium (Sr) et l'yttrium (Y) dans huit étoiles de NGC 6522, le plus vieil amas d'étoiles de la Galaxie, âgé d'au moins 12 milliards d'années. Ces deux éléments se révèlent très abondants, par rapport à l'enrichissement attendu dans des étoiles massives de première génération.

Une rotation rapide pourrait expliquer cette anomalie. Le strontium, l'yttrium et d'autres éléments sont créés dans les étoiles par un mécanisme de capture de neutrons lents (ou « processus S »), dans lequel des noyaux atomiques acquièrent des nucléons en absorbant des neutrons, qui se désintègrent éventuellement en protons ensuite.

Des travaux précédents avaient montré qu'une vitesse de rotation très élevée multipliée par 10 000 l'efficacité du processus S. La rotation mélange en effet les différentes couches de l'étoile où brûle du combustible, favorisant une cascade de réactions nucléaires qui aboutit à du néon radioactif, émetteur de neutrons.

Les chercheurs ont ainsi calculé que des étoiles massives de faible métallicité ayant une vitesse de rotation en surface de 500 kilomètres par seconde expliqueraient les concentrations de strontium et d'yttrium observées. Par comparaison, la surface du Soleil tourne à deux kilomètres par seconde.

Les premières étoiles de l'Univers auraient donc été en rotation ultrarapide. Ce résultat, s'il se confirme, fournirait une contrainte importante sur les modèles de formation des étoiles de première génération qui, jusqu'ici, ne pouvaient prédire la vitesse de rotation.

→ Philippe Ribeau-Gésippe

Nature, vol. 472, pp. 454-457, 2011

En bref

CASSE-NOISETTES HERBIVORE

D'après la forme de ses dents, on pensait que *Paranthropus boisei*, un hominidé qui vivait dans l'Est africain il y a un à deux millions d'années, se nourrissait de noisettes – d'où son surnom Casse-noisettes. Des anthropologues américains et kenyans ont prouvé qu'il mâchait surtout des herbes : chez 22 individus, ils ont observé que les proportions des isotopes de carbone contenus dans l'émail dentaire – une signature du régime alimentaire – étaient similaires à celles d'herbivores contemporains.

SOMMEIL NÉFASTE

Trop dormir ou pas assez pourrait accélérer le vieillissement cognitif. Selon une étude épidémiologique franco-finno-britannique sur 5 431 individus âgés de 35 à 55 ans, allonger à plus de huit heures ou réduire à moins de six heures son temps de sommeil perturberait des fonctions cognitives telles que la capacité de raisonnement, le vocabulaire et la fluidité du langage. Toutefois, si elle est aussi altérée par des nuits trop courtes, la mémoire ne le serait pas par leur allongement.

GARE AU TABAC !

Des écologues allemands ont découvert le stratagème qui permet à la plante de tabac de lutter contre son prédateur, la chenille *Manduca sexta*. Les feuilles de tabac sont dotées de petits poils qui libèrent des sucres dont les chenilles – qui dévorent ces feuilles – sont friandes. Les sucres digérés forment des acides volatils, parfumant d'une odeur distinctive les chenilles (et leurs excréments). Des fourmis, attirées par l'odeur, les localisent et s'en nourrissent.

En bref

SALAMANDRE VÉGÉTALE

Ryan Kerney et ses collègues, au Canada, ont découvert une étonnante association entre la salamandre maculée *Ambystoma maculatum* et les algues vertes *Oophila amblystomatis*. On trouve ces algues à l'intérieur des cellules embryonnaires de la salamandre jusqu'à un stade avancé du développement. On trouve aussi leurs kystes dans les œufs à des stades très précoces. Enfin, des traces d'algues ont été repérées dans le système reproducteur des salamandres adultes. Les algues seraient ainsi transmises d'une génération d'amphibiens à la suivante !

MARS GLACÉE

On savait que la calotte au pôle Sud de Mars contient de la glace de dioxyde de carbone. Des images radar du satellite *Mars Reconnaissance Orbiter* viennent d'y révéler un nouveau dépôt de glace carbonique, enfoui, d'un volume de 12 000 kilomètres cubes. C'est 30 fois plus que les dépôts connus au pôle Sud, et l'équivalent de 80 pour cent du dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère martienne. Sa sublimation bouleverserait le climat martien.



© Shutterstock/Henason

Les cendres éjectées par le volcan islandais Eyjafjöll peuvent endommager les réacteurs d'avions. Une nouvelle céramique pourrait remédier au problème.

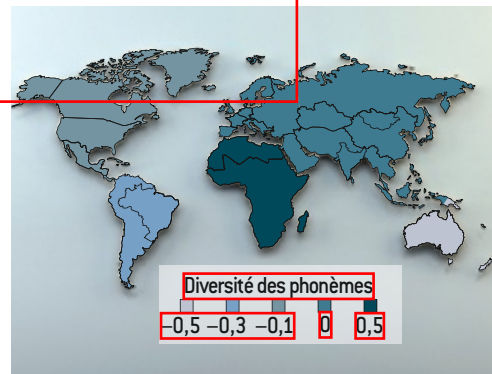
Linguistique

La diversité mondiale des phonèmes

Un phonème est un élément sonore de base du langage articulé. Notés /o/, /a/ ou /t/, les phonèmes doivent être combinés pour produire du sens. Quentin Atkinson, de l'Université d'Auckland, en Nouvelle-Zélande, a mis au point une méthode pour étudier leur diversité à travers le monde, et conclut qu'elle décroît à partir d'une source située en Afrique.

Comment s'y est-il pris ? Il a exploité le WALS (World Atlas of Language Structures). Cette base de données des structures langagières rassemble en particulier des informations sur trois aspects importants de la diversité des phonèmes au sein d'une langue : le nombre de voyelles, le nombre de consonnes et la complexité des intonations. Ces trois grandeurs sont mesurées sur des échelles différentes ; plus leurs valeurs sont grandes, plus la diversité des phonèmes l'est. Q. Atkinson les a d'abord ramenées sur une même échelle, puis il en a calculé la moyenne avant de les reporter sur une carte mondiale.

Ainsi définie, la diversité phonémique se révèle être grande en Afrique, inférieure et à peu près égale en Asie et en Europe, plus faible en Amérique du Nord, plus faible encore en Amérique du Sud et encore plus faible en Océanie. Sa décroissance en fonction de la distance à l'Afrique est similaire à celle de la diversité génétique et, comme elle, raconte l'histoire de la conquête de la planète par des groupes



Plus on s'éloigne de l'Afrique et plus la diversité phonémique des langues diminue. Pour être comparables, les données liées à la diversité phonémique ont été ramenées sur une même échelle statistique centrée sur zéro.

humains s'isolant de plus en plus à mesure qu'ils s'éloignent du berceau africain. Pour discutable qu'elle soit sans doute, cette archéologie linguistique restitue la conquête de la planète par *Homo sapiens*. L'aptitude à combiner des phonèmes y a-t-elle joué un rôle crucial ?

→ F. S.

Q. Atkinson, *Science*, vol. 332, n°6027 pp. 346-349, 2011

Matériaux et structures

Protéger les avions des cendres volcaniques

L'éruption de l'Eyjafjöll, en avril 2010, a projeté dans l'atmosphère une grande quantité de cendres, ce qui a paralysé le trafic aérien en Europe. En effet, on craignait que les cendres fondent dans les réacteurs des avions, et dégradent les céramiques isolantes.

La céramique utilisée en aéronautique est composée d'un mélange d'oxydes de zirconium (ZrO_2) et d'yttrium (Y_2O_3) ; elle isole le réacteur des pièces situées à proximité. Sa structure poreuse la rend flexible : elle peut se déformer sans se rompre lors des changements de température. Nitin Padture, de l'Université de l'Ohio,

et ses collègues américains et russes ont étudié son comportement quand elle est chauffée à 1200°C en présence des cendres riches en silice, prélevées sur l'Eyjafjöll. Ils ont montré que les cendres fondent et constituent une phase vitreuse peu visqueuse qui pénètre dans les pores. En refroidissant, la silice durcit, diminuant la flexibilité de la céramique, qui risque de se détacher du réacteur.

Les chercheurs ont mis au point une nouvelle céramique d'oxyde de zirconium et de gadolinium ($Gd_2Zr_2O_7$), imperméable aux cendres fondues dès que son épaisseur est supérieure à dix micromètres. À haute température,

cette céramique réagit partiellement avec les cendres et forme de petits cristaux qui colmatent l'entrée des pores. Ainsi, la silice vitreuse ne pénètre plus profondément dans la céramique, et le matériau conserve à peu près sa structure et ses propriétés isolantes.

Ces nouveaux matériaux doivent encore subir des tests pour que l'on sache s'ils conservent leurs propriétés après plusieurs cycles d'élévation de la température. Les avions pourront-ils alors voler à travers des nuages de cendres volcaniques ?

→ G. F.

J. Drexler et al., *Advanced Materials*, en ligne, 8 avril 2011

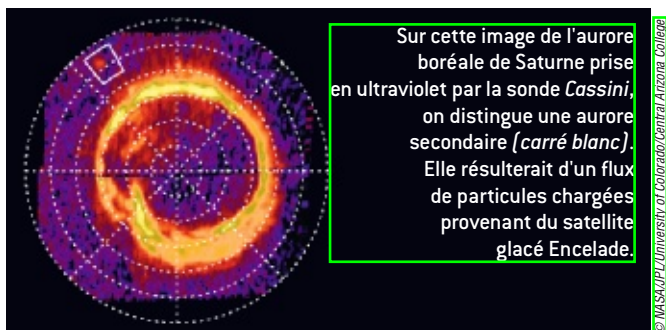
Astronomie

Encelade reliée à Saturne

La lune de Saturne, Encelade, est célèbre pour ses geysers de glace qui jaillissent dans l'espace. Wayne Prior, de l'Université d'Arizona, et ses collègues viennent de découvrir un autre aspect étonnant : un flux d'ions et d'électrons la relie à Saturne et y provoque des aurores polaires localisées.

Comme sur Terre, il existe sur Saturne des aurores polaires provoquées par les particules du vent solaire. Mais en étudiant des images en ultraviolet de ces aurores prises par la sonde *Cassini* en 2008, les astronomes ont découvert une tache lumineuse moins intense, de 1200 kilomètres de diamètre, à une latitude plus basse que l'aureole principale, et qui se déplace au même rythme qu'Encelade autour de Saturne. Or lors d'un survol d'Encelade à la même époque, *Cassini* avait détecté un flux d'électrons et d'ions du satellite vers la planète : un courant engendré par le mouvement, dans le champ magnétique de Saturne, des particules de glace ionisées éjectées par les geysers et entourant Encelade. L'intensité et le point d'impact estimé de ce flux sur Saturne concordent avec la tache observée : en pénétrant dans son atmosphère, il provoquerait cette aurore secondaire.

→ Ph. R.-G.

W. Prior, A. Rymer et al., *Nature*, vol. 472, pp. 331-333, 2011

Génétique

Flore intestinale : trois types

En mars 2010, le consortium international MetaHIT (*Metagenomics of the human intestinal tract*), coordonné par l'INRA de Jouy-en-Josas, a déterminé l'ensemble des gènes des bactéries peuplant notre tube digestif. Il montre aujourd'hui que la population humaine se répartit en seulement trois groupes bactériens distincts ou « entérotypes », selon la nature et la fonction des bactéries qui composent la flore intestinale.

C'est en étudiant les bactéries intestinales de plus de 250 personnes d'origines européenne, américaine et japonaise que les chercheurs ont obtenu ce résultat. Le premier groupe exprime davantage les enzymes intervenant dans la production de vitamine B7, impliquée dans le métabolisme des graisses. Le deuxième surexprime les intermédiaires de synthèse de la vitamine B1, nécessaire au fonctionnement du système nerveux et à l'assimilation des hydrates de carbone. Le troisième surexprime les molécules participant au métabolisme du fer. Cette classification des entérotypes de notre organisme permettra peut-être de développer des outils de diagnostic, voire des traitements pour les maladies impliquant les micro-organismes intestinaux.

→ Bénédicte Salthun-Lassalle

M. Arumugam et al., *Nature*, en ligne, 21 avril 2011

Physique médicale

Un nouveau radio-isotope pour traiter le cancer

Pour traiter les leucémies et les métastases des cancers évolués, on dispose essentiellement de deux arsenaux thérapeutiques : la chimiothérapie et la radiothérapie. L'une et l'autre ont leurs indications en fonction du malade et de la tumeur, leurs avantages et leurs inconvénients. L'un d'eux est qu'elles détruisent les cellules tumorales, mais peuvent aussi endommager des cellules saines. C'est pourquoi les chercheurs conçoivent des molécules radioactives toujours mieux ciblées sur les cellules tumorales et émettant un rayonnement très focalisé. Les équipes de l'Institut Laue-Langevin (ILL) à Grenoble, de l'Institut Paul Scherrer, à Villigen, en Suisse, et de l'Université technique de Munich, en Allemagne, viennent de mettre au point un radio-isotope présentant ces propriétés.

Ces chercheurs ont choisi le terbium 161 (^{161}Tb). Son noyau radioactif se désexcite en émettant des électrons par rayonnement bêta, comme d'autres radio-isotopes actuellement utilisés. Ce noyau peut aussi transférer une partie de son énergie par couplage à un électron proche ; ce dernier s'échappe, provoquant un réarrangement des couches électroniques qui aboutit à l'émission d'électrons dits Auger. Peu énergétiques, ces derniers parcourent moins de quelques dizaines de micromètres, soit environ la taille d'une cellule. Ils sont environ deux fois plus nombreux que les électrons bêta, plus énergétiques, qui parcourent la matière sur plusieurs millimètres.

Le terbium 161 est obtenu artificiellement en irradiant une cible enrichie en gadolinium 160 par le flux de neutrons dans le réacteur nucléaire de l'ILL. Le radio-isotope purifié est ensuite couplé à un « vecteur » biologique qui reconnaît spécifiquement les cellules tumorales. D'où le nom de

radiothérapie vectorielle donné à la méthode.

Le complexe, injecté au patient, se lie aux cellules cancéreuses, par exemple de certaines tumeurs gastro-intestinales. Le faible rayonnement gamma également émis par le terbium 161 permet de visualiser, au moyen d'un scanner adapté, si l'« adressage » a été correct.

Ces atomes radioactifs « adressés » aux cellules cancéreuses les irradient de façon localisée : ils épargneraient mieux les tissus sains que les radio-isotopes utilisés jusqu'à présent. En améliorant encore la spécificité des marqueurs des cellules tumorales et en produisant des radio-isotopes causant toujours moins de « dégâts collatéraux », les médecins nucléaires développent des traitements plus efficaces pour lutter contre certains cancers.

→ G. F.

S. Lehenberger et al., *Nuclear Medicine and Biology*, en ligne, 20 avril 2011

La radiothérapie vectorielle peut traiter certaines tumeurs : des molécules radioactives se fixent sur les cellules cancéreuses et les détruisent.

Génétique

Nouveau type de mutations

Les maladies génétiques résultent d'anomalies dans l'ADN, le plus souvent dans les séquences codant une protéine. Patrick Edery, du Centre de recherches en neurosciences de Lyon, et ses collègues ont découvert un nouveau type de mutation où l'ADN codant les protéines reste intact. Rappelons qu'un gène (ADN) est transcrit en un ARN pré-messager constitué d'« exons » codants et d'« introns » non codants, ces derniers étant éliminés lors de l'épissage. L'ARN messager obtenu (les exons raboutés) est traduit en protéine. L'acteur principal de l'épissage est le spliceosome, un complexe d'ARN et de protéines. En s'intéressant au syndrome de Taybi-Linder, qui se traduit par des malformations limitant l'espérance de vie à trois ans, les biologistes ont identifié quatre mutations associées à cette maladie. Elles sont situées dans une région qui code non pas une protéine, mais un élément de certains spliceosomes, un petit ARN nucléaire (ARNsn). Ce rôle inédit d'un ARNsn dans une maladie génétique révèle l'importance de l'épissage dans le bon fonctionnement d'un organisme.

→ Loïc Mangin

P. Edery et al., *Science*, vol. 332, pp. 240-243, 2011

Chimie

Du savon dans les égouts

Dans les canalisations d'eaux usées, les dépôts solides de graisses et d'huiles sont responsables de près de la moitié des bouchons, qui eux-mêmes provoquent près de 50 pour cent des débordements. De quoi sont faits ces dépôts et comment se forment-ils ?

L'équipe de Francis de los Reyes, à l'Université de l'Etat de Caroline du Nord (États-Unis), a établi que la plupart de ces dépôts sont composés à plus de 50 pour cent par des lipides, essentiellement de l'acide palmitique, un acide gras saturé très répandu. De même, dans 85 pour cent des dépôts, l'élément métallique dominant est le calcium, avec une concentration moyenne de 4,2 grammes par litre. F. de los Reyes et ses collègues ont confirmé expérimentalement l'hypothèse que les dépôts se forment par une réaction de saponification entre du dichlorure de calcium (CaCl_2) et des acides gras libres. Pour cela, ils ont notamment fabriqué du savon en laboratoire à partir de CaCl_2 et ont comparé, par spectroscopie infrarouge, ce savon avec les dépôts échantillonnés. Ainsi, ces dépôts seraient pour l'essentiel des sels métalliques d'acides gras : du savon.

→ Maurice Mashaal

X. He et al., *Environmental Science & Technology*, en ligne, 21 avril 2011

Physique

La stabilité complexe du vélo

Vous croyez savoir faire du vélo ? En fait, c'est le vélo qui sait faire, car il se stabilise à partir d'une certaine vitesse. On pensait que cette stabilité résultait d'une coopération entre deux couples mécaniques : le couple gyroscopique et celui lié à la réaction du sol sur la roue avant, nommé effet de chasse. Or J. Kooijman, de l'Université de Delft, en Hollande, et des collègues hollandais et américains ont construit un vélo stable dépourvu de ces deux effets.

Quand un vélo en mouvement penche, le couple gyroscopique, dû à la rotation simultanée du guidon et de la roue avant, tend à redresser la roue et contribue donc à redresser le vélo. Par ailleurs, l'effet de chasse tend aussi à redresser la roue quand l'intersection de l'axe du guidon avec le sol est en avant du contact roue-sol. L'idée que ces deux couples suffisent à redresser le vélo est répandue... mais fausse ! Selon J. Kooijman, elle

remonte aux interprétations erronées des pionniers de la physique du vélo, au XIX^e siècle, puis à des calculs faux au XX^e siècle. En fait, calculs et mesures prouvent que les deux couples ne sont pas essentiels et que tout dépend de la configuration du vélo. Pour l'illustrer, les physiciens ont construit un vélo stable dans lequel une roue contrarotative annule l'effet gyroscopique et dont l'axe du guidon rencontre le sol en arrière du contact roue-sol.

D'où vient, alors, la stabilité du vélo ? Pour les chercheurs, son origine est multifactorielle. Trois idées se dégagent : c'est la force centripète due à la courbe suivie qui redresse le vélo ; la trajectoire du vélo doit donc se courber assez dès qu'il penche ; ce comportement se manifeste au-dessus d'un seuil de vitesse (environ 11 kilomètres par heure pour les vélos usuels).

→ F.S.

J. Kooijman et al., *Science*, vol. 332, n° 6027, pp. 339-342, 2011

Le vélo conçu par l'équipe de J. Kooijman.

J. Kooijman, Université de Delft

DERNIÈRE minute ...

TROIS PAIRES D'AILES

Les insectes ont, au plus, deux paires d'ailes. C'est du moins ce que l'on croyait jusqu'à ce que les travaux de Nicolas Gompel et de ses collègues ne remettent en question ce dogme. Preuves génétiques et anatomiques à l'appui, ils ont montré que chez les membracides (des cousins des cigales), le casque est une troisième paire d'ailes modifiée. Cet appendice, parfois exubé-

rant, peut ressembler à une épine, une fiente d'oiseau, voire une fourmi en position d'attaque !

LE RIZ DOMESTIQUÉ EN CHINE

Des généticiens américains ont montré que *Oryza sativa japonica* et *Oryza sativa indica*, les deux sous-espèces de riz domestique, sont plus proches l'une de l'autre qu'elles ne le sont de toutes les espèces de riz sauvage connues. Ainsi,

elles ont une origine commune qui, d'après l'horloge moléculaire du riz de culture construite par les chercheurs, pourrait être une espèce sauvage de riz domestiquée dans la vallée du Yang-Tse en Chine il y a quelque 8 200 ans.

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

■ POUR LA SCIENCE

VOTRE ABONNEMENT 100 % NUMÉRIQUE

1 an au prix de 48 €

soit **4 € seulement par numéro** au lieu de 5,20 €

Pour consulter et télécharger
en toute liberté sur www.pourlascience.fr
les 12 prochains numéros
dès leur parution.



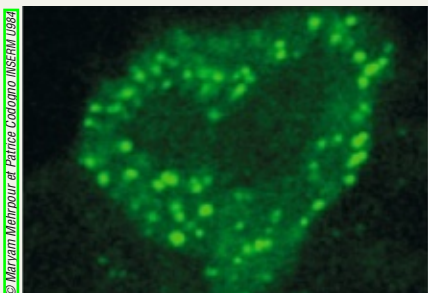
Oui, je m'abonne
à *Pour la Science* 100 % numérique
1 an (12 numéros) pour 48 €

Je préfère découvrir toutes
les offres d'abonnement disponibles
en cliquant ici.

Retour sur des sujets déjà traités dans nos colonnes

→ MÉCANISMES MOLÉCULAIRES DE L'AUTODESTRUCTION

Quand une cellule eucaryote (ayant un noyau) manque de nutriments (des acides aminés par exemple) ou d'énergie, elle est capable de consommer ses propres constituants pour survivre. Ce phénomène, nommé autophagie, permet notamment à la cellule de résister à un stress extérieur, de ralentir son vieillissement et de lutter contre certaines infections (voir *S'autodétruire pour survivre*, *Pour la Science*, mai 2006, <http://bit.ly/plsoer343>). Comment est-il contrôlé? Alfred Meijer, du Département de biochimie médicale à Amsterdam, et Patrice Codogno, de l'INSERM 984 à l'Université Paris-Sud 11 de Châtenay-Malabry, présentent les travaux de deux équipes américaines qui détaillent les voies de signalisations intracellulaires reliant le manque de nutriments ou d'énergie et le déclenchement de l'autophagie (*Current Biology*, mars 2011). L'autophagie est inhibée par la voie dite mTor, qui est elle-même activée par une augmentation des quantités d'acides aminés disponibles pour la cellule. Et le manque d'énergie cellulaire stimule la voie de la protéine kinase activée par l'AMP (AMPK), qui inhibe mTor et active ainsi l'autophagie. Les auteurs de ces études montrent que l'AMPK peut aussi stimuler directement l'autophagie en modulant l'activité de protéines impliquées dans la machinerie autophagique. Ces données soulignent l'importance de l'autophagie dans l'intégration des modifications des conditions nutritionnelles.



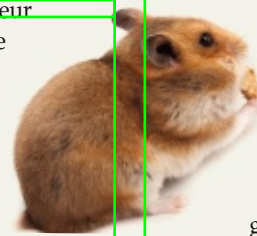
En situation de stress, la formation de structures nommées autophagosomes (en vert) permet à la cellule de consommer une partie de ses constituants pour survivre.

→ UNE PROTÉINE DE LÉZARD VIEILLE DE 50 MILLIONS D'ANNÉES

Des composés organiques peuvent résister à la fossilisation, sous certaines conditions, et se conserver durant des millions d'années. Les paléontologues retrouvent ainsi dans des os de dinosaures des matériaux organiques, par exemple des restes de cellules sanguines et osseuses (voir *Dinosaures: on a retrouvé leur sang*, *Pour la Science*, avril 2011, <http://bit.ly/plsoer402>). C'est maintenant au tour des lézards: l'équipe dirigée par Roy Wogelius et Phil Manning, de l'Université de Manchester en Angleterre et de l'Université de Pennsylvanie à Philadelphie, a identifié des amides dans la peau d'un lézard bien conservé et trouvé dans des sédiments de l'Utah aux États-Unis, datant de 50 millions d'années (*Royal Society Proceedings B: Biological Sciences*, mars 2011). Les amides sont des composés organiques possédant un atome d'azote lié à un groupe carbonyle; ils forment la liaison peptidique entre les différents acides aminés des protéines, les briques élémentaires de la vie. Pour les voir et les caractériser dans la peau du lézard, les géochimistes ont utilisé trois techniques (l'imagerie infrarouge, l'imagerie aux rayons X et la spectroscopie de masse) et ont montré que les molécules organiques originales de la peau qui se sont décomposées il y a 50 millions d'années ont formé des liaisons chimiques avec des traces de métaux. Ces derniers auraient joué le rôle de « ponts », évitant la destruction totale des composés organiques par les sédiments.

→ POUMONS AU REPOS

Lorsqu'ils hibernent, les mammifères tels la marmotte ou le hamster doré de Syrie ralentissent considérablement leur métabolisme, et leur température corporelle chute de 37°C à un ou deux degrés au-dessus de la température ambiante. Toutefois, cette « torpeur » est entrecoupée de brefs réveils, à intervalles réguliers, qui s'accompagnent d'une remontée de la température (voir *Sommeil d'hiver*, *Pour la Science*, février 2007, <http://bit.ly/plsoer352>). On commence à comprendre les mécanismes cellulaires favorisant une diminution du métabolisme cellulaire lors de ces épisodes de torpeur, mais on ignore comment les organes – notamment les poumons – de ces mammifères résistent à de telles variations de températures. En effet, soumis à de basses températures, la plupart des organes des mammifères subissent des lésions et ne pourraient résister à une hibernation. Fatemeh Taleai, de l'Université de Groningen, aux Pays-Bas, et ses collègues ont montré que les tissus des poumons du hamster doré changent de struc-



Hamster doré (*Mesocricetus auratus*)

ture moléculaire dans les phases de torpeur (*The Journal of Experimental Biology*, mars 2011). Les alvéoles des poumons sont entourées de muscles lisses et de collagène, une protéine qui favorise l'adhérence de ces alvéoles aux muscles. Les biologistes ont montré que, quand l'animal sombre dans la torpeur, la quantité d'actine – un composant des filaments musculaires – augmente progressivement, puis diminue pour retrouver son niveau initial deux heures après la sortie de la torpeur. De plus, la quantité de collagène augmente dans les premières 24 heures de l'hibernation avant de diminuer jusqu'au réveil. Ainsi, chez les hamsters, la structure moléculaire des alvéoles pulmonaires peut changer rapidement et de façon réversible. Or les êtres humains souffrant d'asthme ou de troubles obstructifs chroniques présentent le même type de modifications moléculaires dans leurs poumons. Peut-être pourra-t-on éviter ces anomalies chez l'homme quand on saura comment le hamster retrouve si vite des poumons fonctionnels lors de ses réveils.

→ Bénédicte Salthun-Lassalle

Quand la créativité et la science se rencontrent

APPEL À CONTRIBUTIONS



**Le plus grand rendez-vous scientifique interdisciplinaire d'Europe
se tiendra à Dublin du 11 au 15 juillet 2012.**

Pour soumettre vos contributions, connectez-vous avant le 30 juin 2011
sur le site www.esof2012.org

POINT DE VUE

Coup de pouce pour la thérapie génique

Une nouvelle réglementation permettra à des associations à but non lucratif d'explorer les ressources de la thérapie génique pour traiter les maladies rares dont l'industrie pharmaceutique se désintéresse.

Pierre TAMBOURIN

Le 22 mars 2011, le Parlement français a adopté divers amendements au Code de la santé publique. L'un d'eux a une importance particulière. Quand les décrets d'application seront publiés, il permettra à des organismes à but non lucratif – après accord des autorités de santé – de créer un établissement pharmaceutique afin de produire des « médicaments de thérapie innovante », c'est-à-dire issus des diverses approches de la thérapie génique et cellulaire.

Alors que jusqu'à présent seule une société privée pouvait obtenir le statut d'établissement pharmaceutique, la nouvelle réglementation est une réponse bienvenue au manque cruel de médicaments pour traiter les maladies rares. À plus long terme, elle pourrait aussi accélérer la mise au point de traitements pour des maladies répandues, tels les cancers.

Une maladie rare touche moins de une personne sur 2 000, selon la définition européenne. On connaît quelque 7 000 maladies rares, nombre qui augmente sans cesse à mesure qu'on les identifie. La plupart sont dues à un dysfonctionnement causé par un gène muté. Environ trois à quatre millions de personnes sont concernées en France, près de 25 millions en Europe. Un exemple de maladie rare est la myopathie de Duchenne, maladie dégénérative des muscles qui touche un garçon sur 3 500 environ, et pour laquelle il n'existe pas de traitement.

Sur les milliers de maladies rares, seules une trentaine peuvent être traitées par des médicaments existants. Et le marché pour chacune des maladies rares étant très restreint, les industries pharmaceutiques sont peu intéressées par la recherche de nouvelles molécules. Le long processus qui va de la découverte d'une molécule potentiellement intéressante à la commercialisation d'un nouveau médicament, en passant par les essais cliniques et l'autorisation de mise sur le marché, coûte extrêmement cher. Les industriels ne s'y engagent que si la rentabilité est à la clef. Ce qui suppose à la fois

LE GÉNÉTHON A DES MOYENS importants, entièrement dédiés aux recherches destinées à soigner les maladies rares.

un marché suffisamment vaste et une certaine pérennité du médicament développé.

Face aux maladies rares, les industriels privilégient la démarche consistant à examiner l'ensemble des molécules pharmaceutiques existantes pour rechercher si certaines d'entre elles pourraient être utiles. L'une des approches est celle du généticien Daniel Cohen, créateur de la nouvelle Société Pharnext : par modélisations théoriques, il recherche de nouvelles applications à des molécules déjà commercialisées.

Cependant, une autre stratégie possible, plus innovante, est d'essayer de corriger

l'anomalie génétique elle-même par thérapie génique. L'idéal serait d'éliminer dans les cellules du malade le gène défectueux et de le remplacer par la version normale du gène. Pour l'instant, on a réussi à le faire chez la souris, mais pas chez l'homme. Chez l'homme, on se contente d'introduire la version normale du gène, qui cohabite donc avec le gène muté et compense son dysfonctionnement – du moins l'espère-t-on. L'introduction du gène normal dans les cellules se fait à l'aide d'un « vecteur », généralement un virus rendu inoffensif dans lequel le gène thérapeutique a été inséré.

Le domaine de la thérapie génique, encore au stade expérimental, évolue vite, tant par les vecteurs utilisés, que par la façon de modifier les cellules ou par le type de cellules modifiées. Les recherches sont menées par quelques laboratoires publics français et internationaux de premier plan. En revanche, les entreprises biopharmaceutiques participant au développement des thérapies innovantes sont encore rares. Si elles s'y intéressent, ce n'est pas pour les maladies rares, mais parce que le rôle des gènes et des mutations génétiques est aujourd'hui avéré dans le cancer. Ainsi, des dysfonctionnements du gène suppresseur de tumeurs p53 sont impliqués dans divers types de cancers. Si la thérapie génique progresse, elle pourrait améliorer le traitement des maladies rares, mais aussi, vraisemblablement, de certains cancers.

Comment faire progresser la thérapie génique plus rapidement ? Le secteur industriel contribue très peu à la mise au point de ce type de thérapie. Quant au secteur public, ses chercheurs s'occupent en priorité des maladies les plus fréquentes. C'est pourquoi ces recherches se sont développées là où des associations de malades – préoccupées par le manque de moyens attribués à la recherche sur les maladies rares – se sont impliquées.

En France, le principal acteur de ce type est l'AFM, l'Association française contre les myopathies, qui recueille chaque année plusieurs dizaines de millions d'euros de dons et dont une part très importante est consacrée à la recherche. Cette association, avec son Laboratoire *Généthon*, est le premier organisme concerné par la nouvelle réglementation sur les médicaments de théra-

pie innovante, et l'association a d'ailleurs joué un rôle actif dans ce changement législatif. *Généthon Bioproducts*, centre de production de vecteurs de *Généthon*, compte produire, dès 2012, ses premiers vecteurs de gènes médicaments.

Toutefois, les défis posés par la thérapie génique restent nombreux. Contrairement aux vecteurs qui ne soulèvent pas de difficultés particulières, c'est le site d'insertion du gène médicament dans la cellule qui pose problème. Quand ce dernier ne se positionne pas correctement, il risque de perturber l'expression d'autres gènes et de déclencher d'autres pathologies. Ce fut le cas pour certains des premiers enfants souffrant d'une maladie grave de leur système immunitaire et traités par thérapie génique.

Les travaux continuent également sur le type de cellules qu'il est le plus judicieux

de modifier. Des cellules souches ? Des cellules différenciées ? Tous les tissus sont-ils susceptibles de bénéficier de la thérapie génique ? Les maladies rares touchant le cerveau semblent parmi les plus problématiques.

Parce que le *Généthon* a des moyens importants entièrement dédiés aux recherches de thérapie génique destinées – du moins dans un premier temps – à soigner les maladies rares, et parce que les connaissances progressent dans ce domaine, on peut espérer que les malades qui se sentent aujourd'hui souvent oubliés seront bientôt mieux pris en compte et mieux traités. ■

Pierre TAMBOURIN est le directeur général du Groupement d'intérêt public Genopole, à Évry-Corbeil.

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

ÉCONOMIE

Quand les meilleurs s'en vont

Ceux dont le travail leur permet de s'expatrier cherchent systématiquement les pays dont la fiscalité est la plus favorable. Ce sont les moins bons qui restent !

Ivar EKELAND

La France exporte deux catégories de personnes : les joueurs de football et les traders. Toutes les gloires du football français

– Platini, Cantona, Zidane, Henry – ont fait les beaux jours de clubs étrangers, et bien peu nombreux sont les titulaires de l'équipe nationale qui jouent en France. Les grandes places financières – New York, Londres, Hong Kong – s'arrachent les diplômés de nos grandes écoles et de nos masters de finance, et quand un trader de *Goldman Sachs* est convoqué devant une commission du Sénat américain... c'est bien souvent un jeune centrien. Voilà un bel hommage rendu à

la qualité des formations que nous dispensons, en football et en finance, mais pourquoi le pays n'en profite-t-il pas ? Le dernier club français à avoir gagné une finale euro-

péenne est Marseille, il y a 20 ans, et quant à nos banques, il suffit de citer le *Crédit Lyonnais*, la *Société Générale* ou *Natixis* pour que fusent les propos sarcastiques.

Pourquoi ces jeunes, formés à grands frais, choisissent-ils d'exercer leurs talents à l'étranger ? Est-ce par manque de patriotisme ? C'est ce que semble penser la Fédération française de football, et il est question d'y remédier en n'admettant dans les centres de formation que des jeunes qui donnent des garanties suffisantes. Est-ce que parce que les salaires sont plus élevés ? Difficile d'en juger, car les chiffres sont jalousement gardés. Aussi faut-il remercier la Communauté européenne, qui a réalisé cette chose



très rare en économie, une expérience grande nature. Je veux parler de l'arrêt Brosnan de 1995, qui a transformé le marché du football européen. Rappelons de quoi il s'agit.

Avant 1995, aucun club européen ne pouvait aligner plus de trois joueurs étrangers. En outre, lorsque le contrat d'un joueur venait à expiration, et que celui-ci souhaitait partir pour un autre club, le club d'origine était en droit de demander une prime de transfert. Ces deux règles limitaient considérablement la mobilité des joueurs entre les pays européens, et ce sont justement celles qui ont été cassées par la Cour européenne de justice, au motif qu'elles entravaient la liberté de circulation des travailleurs, et qu'elles étaient de ce fait contraires au Traité de Rome. Que s'est-il donc passé à partir de 1996 ? C'est ce qu'ont étudié Henrik Kleven et ses collègues de la *London School of Economics*.

Leur première conclusion est que les joueurs sont allés là où ils étaient le moins imposés : les pays où la tranche supérieure de l'impôt sur le revenu est la plus élevée

(dont la France) sont ceux où la proportion de joueurs étrangers dans les clubs est la plus faible, et où la proportion de joueurs nationaux qui s'expatrient est la plus forte. Mais on peut aller plus loin dans l'analyse en prenant en considération la qualité des joueurs et des clubs. Dans le football, on a des critères de classement objectifs. Un bon joueur est un joueur qui a été sélectionné en équipe nationale, et il est d'autant meilleur qu'il a été sélectionné plus de fois. Un bon club est un club qui gagne souvent, et il est d'autant meilleur qu'il gagne plus souvent : en se fondant sur les résultats des championnats nationaux et des compétitions internationales, on peut construire un classement des clubs européens. Les économistes londoniens ont montré que l'arrêt Brosnan a eu un effet très bénéfique sur les clubs des pays les moins imposés : leurs résultats et leurs classements se sont notablement améliorés après 1996.

Au sein de l'Union européenne, certains pays se sont rendu compte de l'aubaine, et ont consenti des régimes fiscaux favo-

rables aux résidents étrangers, notamment les footballeurs : il s'agit de l'Espagne (loi Beckham, du nom du joueur qui en a bénéficié en quittant *Manchester United* pour le *Real Madrid* en 2004), du Danemark et de la Belgique. Cela permet une analyse plus poussée dont il ressort que la fiscalité a un effet différencié selon la qualité des joueurs : une fiscalité attractive, comme celle de l'Espagne, sélectionne les bons au détriment des... moins bons. En effet, il y a un nombre fixe de clubs et un nombre à peu près fixe de joueurs par équipe : si Beckham prend une de ces places, cela en fait une de moins pour ceux qui n'ont pas le même talent !

On ne dispose pas d'études semblables pour les financiers, mais ils sont aussi mobiles que les footballeurs, et sont sensibles aux mêmes incitations. Ne nous étonnons pas de les voir à Londres ou à New York plutôt qu'à Paris, et inquiétons-nous au contraire de la qualité de ceux qui sont restés... ■

Ivar EKELAND est professeur d'économie.

DÉVELOPPEMENT DURABLE

Gaz de schiste : un avenir à préciser

Les réserves de gaz de roche sont importantes et suscitent des espoirs. Peut-on les exploiter sans nuire à l'environnement ? La question reste ouverte.

Bernard TARDIEU

Depuis cinq ans, la production de gaz de roche (des schistes argileux) aux États-Unis a crû rapidement. Elle représente aujourd'hui 54 pour cent de la production de gaz et 17 pour cent de la consommation énergétique totale de ce pays. Les réserves estimées y correspondent à 110 ans de consommation.

Les États-Unis ont ainsi réduit leurs importations de gaz naturel liquéfié. Cela fait partie de leur stratégie énergétique : compte

tenu de la tension sur les marchés d'énergie primaire et de la fin d'une domination totale reposant sur leur puissance militaire et économique, il est vital pour les États-Unis de réduire leur dépendance énergétique vis-à-vis du reste de la planète et d'améliorer leurs positions de négociation sur le marché mondial de l'énergie.

Le développement volontariste du gaz de schiste a permis d'obtenir des prix bas et compétitifs sur le marché américain. Cela s'est-il fait au prix d'une dégradation inac-

ceptable de l'environnement ? Le film *Gasland*, largement diffusé, tend à le montrer : nappes phréatiques polluées, robinets qui crachent du gaz, paysages dégradés... Quels que soient les intérêts défendus par ce film inquiétant, les questions qu'il pose ne peuvent rester sans réponses. De façon évidente, on constate des atteintes graves à l'environnement.

Ces pollutions résultent-elles de comportements industriels inacceptables et délicieux ? Et surtout, peut-on les éviter ?

L'exploitation des gaz de schiste repose sur le fait que des couches d'argilite situées à grande profondeur (1 500 à 3 000 mètres) peuvent contenir du méthane, gaz issu de la transformation des matières organiques emprisonnées lors du dépôt sédimentaire. L'argilite étant une roche très étanche, le méthane y reste piégé.

Pour libérer le gaz, il faut rendre l'argilite poreuse. Pour ce faire, on injecte une grande quantité d'eau à haute pression, supérieure à la résistance de la roche. De nombreuses fissures se développent alors à proximité du forage, le gaz s'échappe et est

question de l'eau chargée de ses additifs. Les sables et billes de céramique introduits avec l'eau, inertes, ne posent pas de difficulté. En revanche, l'eau qui contient divers additifs constitue le problème principal.

Aux États-Unis, la Chambre des représentants a émis en avril 2011 un rapport intitulé *Chemicals used in hydraulic fracturing*. Selon ce texte, les 14 principales compagnies du secteur ont, entre 2005 et 2009, utilisé 2 500 produits contenant 750 composants chimiques. Plus de 650 de ces produits contiennent des composants connus pour leur effet cancérigène, selon les critères américains appliqués à l'eau potable (le *Safe Drinking Water Act*), ou sont des polluants atmosphériques... Peut-on se passer de ces produits, utilisés sans discernement ? La question est à ce jour sans réponse convaincante.

LES PRODUITS CHIMIQUES que l'on ajoute à l'eau constituent manifestement un problème.

collecté. Pour que les fissures ne se referment pas dès que la pression de l'eau baisse, on injecte du sable fin ou de minibilles de céramique en même temps que l'eau. Leur présence dans les fissures empêche celles-ci de se refermer, de sorte que le gaz continue de s'échapper. Les foreurs injectent aussi différents produits chimiques (acides, fluidifiants, etc.) pour obtenir une fissuration plus efficace.

Les forages à grande profondeur, classiques, peuvent être parfaitement étanches et traverser les nappes phréatiques sans les perturber. On peut contrôler ces forages, déceler leurs points faibles et les réparer à l'aide de techniques variées et éprouvées. Un puits qui fuit est un puits mal fait et mal contrôlé !

Généralement, arrivé dans la couche d'argilite, le forage est coudé, avec une courbure compatible avec la souplesse des tubes, et est prolongé horizontalement jusqu'à plusieurs centaines de mètres. La technique des forages horizontaux est utilisée pour explorer et exploiter une vaste zone à partir d'un site unique, par exemple une plateforme d'exploitation du pétrole dans le cas de l'offshore profond.

En résumé, on peut et on doit garantir l'intégrité des puits. On peut limiter l'emprise au sol grâce aux forages horizontaux et préserver les paysages. Reste la

La France aura peut-être besoin des gaz de schiste. Elle importe 98 pour cent de son gaz. La dépendance de notre pays est donc élevée. Le prix du gaz payé par le consommateur dépend de contrats à long terme indexés sur le prix du pétrole, lui-même élevé. En outre, notre consommation de gaz va croître. Ainsi, le réseau électrique français RTE prévoit l'installation d'une puissance de 4,8 gigawatts (l'équivalent de trois centrales EPR) dans les prochaines années sous forme de turbines à gaz à cycle combiné. Et des centrales à gaz classiques auront à compenser les irrégularités de l'éolien et du solaire.

Alors même que l'énergie nucléaire est fragilisée par l'accident de Fukushima, notre pays peut-il renoncer à la recherche de ressources énergétiques sur son sol ? Notre avenir énergétique est précaire et la précaution voudrait que l'on analyse toutes les ressources potentielles. Le contraire serait inconséquent et imprudent. Les gaz de roche constituent, au moins pour certains pays, une ressource future. Mais il faut d'abord savoir comment se passer des produits chimiques qui polluent à long terme l'eau et les sols.

Bernard TARDIEU est membre de l'Académie des technologies et y préside la commission *Énergie et changement climatique*.



MUSÉUM NATIONAL
D'HISTOIRE NATURELLE

Biodiversité



**The
Natural
History
of Santo**

edited by
**Philippe Bouchet,
Hervé Le Guyader
& Olivier Pascal**

Les îles du Pacifique sont célèbres pour le très haut niveau d'endémisme et la grande vulnérabilité de leurs faunes et de leurs flores. L'île d'Espirito Santo, ou Santo, cumule les superlatifs : la plus grande et la plus haute du Vanuatu, Santo est un extraordinaire microcosme géographique et culturel, avec récifs, grottes, montagnes, îles et îlots satellites, et une occupation humaine qui remonte à 3 000 ans. Renouant avec l'esprit des « Grandes Expéditions Naturalistes », l'expédition Santo 2006 avait mobilisé sur le terrain plus de cent cinquante scientifiques, bénévoles et étudiants de vingt-cinq pays. Petit tour de force éditorial avec plus de 100 auteurs, ce *Natural History of Santo* est un éloge de la biodiversité de cette « île-planète ». À la fois beau livre richement illustré et bilan des connaissances scientifiques, *Natural History of Santo* se veut un outil de connaissance pour sa conservation durable. Il s'adresse autant aux acteurs locaux du développement et de l'éducation qu'aux naturalistes du monde entier.

ISBN : 978-2-85653-627-8 • format 210 x 297 mm
texte en anglais • impression quadrichromie
nombreuses photos • 544 p. • 59 € TTC

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES DU MUSÉUM

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

VRAI OU FAUX

Le jeûne est-il sain ?

Non, il supprime les sources d'énergie de l'organisme. Pourtant, il revient à la mode, notamment pour « purifier » l'organisme.

Jean-Michel LECERF



L'homme moderne est souvent gavé de nourriture et de biens de consommation : il est repu ! Il n'est pas pour autant comblé. Dès lors, doit-il réapprendre à jeûner ? Le

jeûne est une privation volontaire, ou non, de nourriture. Il peut avoir une dimension spirituelle. Jeûner, c'est aussi apprendre à se détacher du corps, des sens, aller à l'essentiel, écouter l'autre... Le jeûne revient à la mode. Pourtant, il est néfaste pour la santé. Revenons sur le sens de cette pratique avant d'en présenter les conséquences.

Dans toutes les religions, il y a une recherche d'ascèse et d'effort à travers le jeûne. Dans la religion chrétienne, le jeûne se limite à celui du carême, où il est associé à la prière et à la charité, notamment le mercredi des Cendres (premier jour du carême) et le vendredi saint. Le jeûne devient partage et offrande ; il n'est ni une mortification ni une performance. Dans la religion musulmane, le Ramadan est un jeûne diurne ; c'est un rite, un signe de reconnaissance entre croyants et d'appartenance à une communauté.

Proche de cette dimension spirituelle, le jeûne de la non-violence est une protestation silencieuse, mais visible, des causes humanistes. On est là dans une dimension philosophique, voire politique. Le jeûne conscient de l'anorexique est une autre forme de contestation : il se prive pour dominer et écraser son corps et ses sens. Il trouve du plaisir à supprimer certains plaisirs sensoriels. Le jeûne sanitaire moderne est aussi une protestation contre la suralimentation et l'accumulation de « toxines ». C'est ainsi qu'aujourd'hui, de nombreux groupes prônent le jeûne, en tant que thérapie. Les défen-

seurs de ce principe et leurs adeptes parlent de détoxification, de purification et de mise au repos de l'organisme. Mais ce discours ésotérique n'est ni scientifique ni médical.

Le jeûne fait partie de la physiologie normale de l'organisme. Tous les jours, en général la nuit, on cesse de se nourrir pendant 4 à 12 heures. L'organisme trouve alors son énergie, sous forme de glucose, en puisant dans le stock hépatique et musculaire de glycogène – le principal glucide de réserve –, puis dans les graisses. Si le jeûne se prolonge au-delà de quelques heures, le foie produit du glucose supplémentaire en utilisant les acides aminés dits glucoformateurs qui se trouvent dans les tissus maigres, tels les os et les muscles. Or ces acides aminés sont essentiels au renouvellement des tissus.

La nourriture, source d'énergie vitale

Le cerveau consomme 140 grammes de glucose par jour, et c'est pour assurer cet apport d'énergie que ces mécanismes de survie se mettent en place. En parallèle, la lipolyse – la libération des graisses du tissu adipeux – entraîne la production de corps dits cétoniques, ce qui engendre une anorexie rendant le jeûne « aisé » : on ne se rend pas compte que l'on a faim, alors que les réserves d'acides aminés, de glucides et de lipides s'épuisent.

En aucun cas, le jeûne ou les régimes hypocaloriques drastiques – sans graisses ni glucides – ne peuvent être une méthode d'amaigrissement. Ils entraînent un risque majeur de reprise du poids dans le tissu adi-

peux et non dans le tissu maigre, même s'ils sont associés à un régime hyperprotidique (riche en acides aminés). Chez les personnes âgées, le risque de dénutrition est important, y compris chez les obèses. Et la répétition des jeûnes augmente ces troubles, quel que soit l'âge.

Quant aux défenseurs du jeûne, ils le considèrent comme une thérapie contre les maladies inflammatoires, intestinales ou articulaires par exemple. Qu'en est-il vraiment ? Le jeûne supprime effectivement l'inflammation physiologique survenant après le repas et certains symptômes digestifs (par exemple les ballonnements), et l'amaigrissement diminue l'inflammation modérée liée à l'obésité. Et il est vrai que les choix alimentaires (l'excès de matières grasses par exemple) peuvent moduler cette inflammation « à bas bruit », source de stimulation permanente et délétère du système immunitaire. Mais aucune étude n'a montré de rémission durable ou de guérison de ces troubles avec le jeûne. En fait, on a montré que le jeûne diminue les défenses immunitaires de ces patients, ce qui les affaiblit et les rend plus susceptibles de tomber malades.

Ainsi, le jeûne peut avoir un sens spirituel, philosophique ou politique, mais il n'a aucune justification pour la santé. Si le jeûne peut compenser des excès alimentaires, le bon sens consiste à les éviter. En résumé, bien manger est source de bienfaits, tandis que le jeûne peut engendrer des risques pour la santé lorsqu'il est prolongé.

Jean-Michel LECERF dirige le Service de nutrition à l'Institut Pasteur de Lille.

Abonnez-vous à **POUR LA SCIENCE**

et misez sur la référence scientifique internationale !

1 an ■ 56 €
ou 14 €/trimestre

Vos avantages abonné :

- chez vous tous les mois, l'actualité des sciences expliquée par les chercheurs
- l'accès gratuit à vos numéros en version numérique sur www.pourlascience.fr
- 25% d'économie par rapport au prix de vente au numéro



BULLETIN D'ABONNEMENT

à retourner accompagné de votre règlement à : Service Abonnements • Pour la Science • 8, rue Férou • 75278 Paris cedex 06

☐ **Oui, je m'abonne 1 an et reçois 12 numéros de Pour la Science au prix de 56 €* (au lieu de 74,78 €, prix de vente au numéro). Je bénéficie également des versions numériques sur www.pourlascience.fr.**

* Offre valable en France métropolitaine. Participation aux frais de port à ajouter au prix de l'abonnement : France d'outre-mer et Europe 12 € - autres pays 25 €.

☐ **Je préfère m'abonner à Pour la Science au prix de 14 € par trimestre**. Je reçois 12 numéros par an et bénéficie aussi des versions numériques sur www.pourlascience.fr.**

En cadeau, je reçois le Dossier Pour la Science n° 62 « De quoi est fait l'Univers ? ».

** Abonnement valable uniquement en France métropolitaine, renouvelable à échéance par tacite reconduction et dénonçable à tout moment avec un préavis de 3 mois.

POUR LA SCIENCE

Ce numéro offert avec l'abonnement 14 €/trimestre



J'indique mes coordonnées :

Nom : _____ Prénom : _____
Adresse : _____
Code postal : _____ Ville : _____ Pays : _____ Tél. (facultatif) : _____

☐ Je souhaite recevoir la newsletter Pour la Science à l'adresse e-mail suivante : _____ @ _____

Je choisis mon mode de règlement :

☐ Je règle mon abonnement en une seule fois 56 € (+ frais de port en sus pour l'étranger)

☐ par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ par carte bancaire

N° : _____

Expire fin : _____

Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) : _____

Signature obligatoire : _____

☐ Je préfère le règlement en douceur 14 €/trimestre + en cadeau le Dossier Pour la Science n° 62 « De quoi est fait l'Univers ? ».

Je remplis la grille d'autorisation de prélèvement ci-dessous en joignant impérativement un RIB.

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

Titulaire du compte à débiter

Nom, Prénom : _____

N° : _____ Rue : _____

Code postal : _____ Ville : _____

Établissement teneur du compte à débiter

Établissement : _____

N° : _____ Rue : _____

Code postal : _____ Ville : _____

Compte à débiter

Établissement

Code guichet

N° de compte

Clé RIB

Date et signature (obligatoire)

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

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



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

✓ 1 134 MOTS

J'ai été surpris de lire dans l'article *La production des mots* (*Pour la Science* n°403, mai 2001, http://bit.ly/pls403_mots), qu'un « locuteur adulte connaît entre 20 000 et 60 000 mots de sa langue ». Cela semble élevé. Les individus connaissant plus de 20 000 mots sont sans doute en nombre très restreint, et, pour la majorité de la population, le chiffre correct doit être de quelques milliers. Quelles sont les sources des chiffres évoqués par l'auteur ?

J.E. Livet, Paris

→ FRANÇOIS - XAVIER ALARIO

L'article que vous citez utilise à lui seul 1 134 mots différents, et il est pourtant loin de recouvrir le champ des connaissances « moyennes » ! Estimer à quelques milliers de mots le vocabulaire connu par un individu moyen semble donc très en dessous de la réalité.

L'évaluation du vocabulaire connu est une tâche difficile. Premièrement, on ne peut pas mesurer de façon complète les connaissances ; il faut recourir à des extrapolations. Par ailleurs, il n'y a pas deux personnes identiques, de sorte que l'on estime une distribution de valeurs plutôt qu'une valeur unique. Enfin, il peut être difficile de distinguer le vocabulaire connu du vocabulaire utilisé activement, le premier étant plus vaste que le second.

Les estimations indiquées dans l'article sont celles données dans W.J.M. Levelt, *Speaking*, MIT Press, 1989, qui cite lui-même une référence classique [R. C. Oldfield, *British Journal of Social and Clinical Psychology*, 1963]. Des travaux plus récents donnent des valeurs diverses : une étude portant sur des étudiants anglais indique 16 785 mots connus [D'Anna et al., *Journal of Reading Behavior*, 1991] tandis que des travaux sur des adultes japonais estiment à plus de 60 000 le nombre de mots connus [Amano & Kondo, *ICSLP-1998*, article 0015, 1998]. Ainsi, 20 000 mots paraît une limite inférieure raisonnable pour des locuteurs moyens. Il est sans doute vrai que nous ne

parlons pas tous les jours avec des personnes utilisant 60 000 mots différents.

✓ LAIT ET OMÉGA 3

Selon Jean-Marie Bourre (voir *Le lait est-il une boisson saine ?*, *Pour la Science* n°402, avril 2011, http://bit.ly/pls402_lait), certains acides gras du lait sont favorables pour la santé. J'ai lu que le rapport oméga 3 / oméga 6 dans le lait de vaches nourries avec du maïs et du soja est de 1 / 5, alors qu'il est d'environ 1 / 1 pour le lait de vaches nourries à l'herbe. Or un faible rapport oméga 3 / oméga 6 est défavorable. Le lait de vache « bio » est-il plus équilibré ? Et que penser des laits de chèvre, de brebis, voire de jument, que l'on commence à trouver en supermarché ?

Alexandre Levallois



Le lait d'ânesse est très riche en oméga 3.

→ RÉPONSE DE JEAN-MARIE BOURRE

Plus que l'élevage bio ou pas, c'est le type d'aliment qui intervient dans la composition en oméga 3 et en oméga 6. L'herbe de printemps donne ainsi un lait riche en oméga 3, mais c'est aussi le cas quand la nourriture des vaches est enrichie de graines de lin, par exemple.

Le rapport oméga 3 / oméga 6 recommandé est de 1 / 5. Il est de l'ordre de 1 / 25 dans notre alimentation actuelle ; c'est pourquoi il faut rééquilibrer en consommant des aliments comme les poissons et les fruits de mer, dont les rapports oméga 3 / oméga 6 sont de 25 / 1 et plus. Quant au lait et aux produits laitiers, ils sont équilibrés en oméga 3 et oméga 6. En effet, le rapport

était de 1 / 1 dans les années 1950, quand les vaches étaient nourries à l'herbe, et il reste du même ordre de grandeur aujourd'hui (voir *Les tables de composition des aliments de l'Anses*, <http://www.afssa.fr/TableCIQUAL/>).

Les laits de chèvre et de brebis sont tous deux un peu plus riches en oméga 3 que le lait de vache, le rapport oméga 3 / oméga 6 étant meilleur chez la chèvre. Mais en termes d'acides gras indispensables, et notamment les oméga 3, les laits de jument et d'ânesse sont beaucoup plus intéressants. Est-ce pour cette raison qu'à la fin du XIX^e siècle, les « vacheries » de l'Assistance publique de Paris élevaient des ânesses pour y mettre parfois à téter les nourrissons ?

✓ UN VRAI LASER ?

Les auteurs de l'article *Les lasers à polaritons* (*Pour la Science* n° 401, mars 2011, http://bit.ly/pls401_laser) expliquent que « la condensation de Bose-Einstein des polaritons s'accompagne d'un rayonnement monochromatique, cohérent et intense, bref d'un rayonnement laser ». Mais peut-on vraiment appeler ce rayonnement « laser », puisqu'il n'y a pas d'amplification de la lumière cohérente émise ?

Paul Harriton

→ RÉPONSE DE G. MALPUECH ET D. SOLNYSHKOV

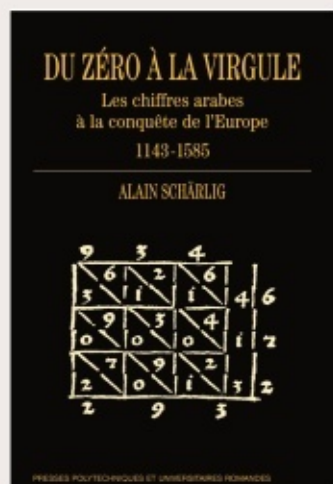
Jusqu'à présent, la seule méthode pour produire un rayonnement cohérent intense était l'utilisation du phénomène d'émission stimulée des photons. L'effet obtenu – l'amplification de la lumière cohérente – et le phénomène physique sous-jacent – l'émission stimulée – sont souvent confondus. Le rayonnement émis par un laser à polaritons est le même que celui qui est émis par un laser « classique ». Si on considère cet objet comme une « boîte noire », il remplit la même fonction qu'un laser : le rayonnement émis est bien un rayonnement laser. En revanche, le phénomène physique sous-jacent qui crée la cohérence est la diffusion stimulée des excitons-polaritons vers leur état condensé et non l'émission stimulée des photons.



**PRESSES POLYTECHNIQUES
ET UNIVERSITAIRES ROMANDES**

Editeur scientifique de référence

DU ZÉRO AU BOSON DE HIGGS...



DU ZÉRO À LA VIRGULE

Les chiffres arabes à la conquête de l'Europe 1143-1585

Alain Schärli

Les chiffres arabes conquièrent l'Occident au début du 12^e siècle, et rendent soudainement possible les quatre opérations par écrit. Une odyssée historique passionnante.

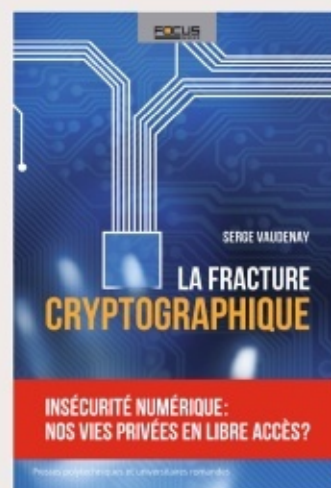
2010, 304 pages, 16×24 cm, broché,
ISBN 978-2-88074-890-6 • 42.50 €

LA FRACTURE CRYPTOGRAPHIQUE

Serge Vaudenay

La cryptographie est-elle au service des usagers qu'elle est censée protéger ? Qui en détient les clés et pour quels usages ?

2011, 216 pages, 15×22,5 cm, broché, ISBN 978-2-88074-830-2 • 29.50 €



TECHNOCIVILISATION

René Berger, Solange Ghernaoui-Hélie

A l'heure du numérique et d'un Internet omniprésent, un historien du futur et une experte internationale en cybersécurité revisitent les fondements de notre technocivilisation en devenir.

2010, 152 pages, 15×22,5 cm, broché,
ISBN 978-2-88074-865-4 • 27.50 €

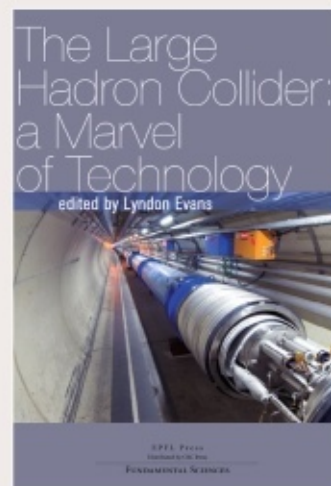
THE LARGE HADRON COLLIDER

a Marvel of Technology

Edited by Lyndon Evans, Project Leader of the LHC

The world's greatest scientific experiment explained by key scientists and program leaders. The book reveals how its technology and detectors will lead to a new understanding of our universe.

2009, 256 pages couleur, 16×24 cm, ISBN 978-2-9400222-34-6 • 47.50 €



NOUVEAUTÉS
ET OUVRAGES DE RÉFÉRENCE

www.ppur.org
www.epflpress.com
Ouvrages disponibles en librairie

QUESTIONS OUVERTES

Longue vie au Web ?

Le Web joue un rôle clef dans la révolution numérique, mais conditionne aussi notre prospérité et notre liberté. Comme la démocratie, il a besoin d'être protégé.

Tim BERNERS-LEE

Le World Wide Web est né sur mon bureau, à Genève, en décembre 1990. Il n'était constitué que d'un site Web et d'un navigateur, hébergés en l'occurrence sur le même ordinateur. Ce dispositif simple a mis en évidence un concept profond : chacun peut partager de l'information avec n'importe quelle autre personne, où qu'elle soit.

Dans cet esprit, le Web (ou la Toile) s'est rapidement étendu. Aujourd'hui, 20 ans après, le Web s'est complètement intégré à notre quotidien, au point que l'on considère son existence comme allant de soi et qu'on s'attende à ce qu'il soit disponible à tout instant, comme l'électricité. Le Web doit sa puissance et son omniprésence au fait qu'il a été construit sur des principes égalitaires et que des milliers d'individus, d'universités et d'entreprises ont travaillé dans le cadre du *World Wide Web Consortium* à étendre ses capacités sur la base de ces principes.

Mais ce Web est menacé. Certains de ses acteurs les plus en vue ont commencé à miner ses principes. De grands sites de réseaux sociaux isolent du reste du Web les informations postées par leurs utilisateurs. Les fournisseurs d'Internet sans fil sont tentés de ralentir le trafic vers les sites avec lesquels ils n'ont pas passé de marchés. Des États démocratiques ou totalitaires surveillent les habitudes de navigation de leurs citoyens et mettent ainsi à mal des droits de l'homme fondamentaux.

Si de telles tendances se généralisent, la Toile se fragmentera. Nous pourrions perdre la liberté de nous connecter à n'importe quel site. Les effets pervers pourraient s'étendre aux téléphones mobiles et aux

tablettes numériques, qui sont aussi des portails d'accès au Web.

Pourquoi s'en inquiéter ? Parce que la Toile est une ressource publique dont tous dépendent. En permettant de communiquer à travers toute la planète, la Toile est devenue vitale pour la démocratie. Elle joue désormais un rôle crucial dans la liberté d'expression. À travers elle, des principes établis dans la constitution américaine, la Grande Charte (*Magna Carta*) britannique et d'autres documents importants trouvent de nouvelles traductions à l'ère des réseaux : la liberté de ne pas être épié, filtré, censuré ou déconnecté.

Préserver l'universalité

Pourtant, les gens semblent penser que le Web fait partie de la nature, et que s'il commence à se flétrir, eh bien, c'est regrettable mais nous n'y pouvons rien. C'est faux : nous façonnons le Web grâce à des protocoles informatiques et des logiciels, processus qui est entièrement sous notre contrôle. Si nous voulons nous informer sur ce que font les gouvernements ou les entreprises, comprendre le véritable état de la planète, trouver un remède contre la maladie d'Alzheimer ou simplement partager nos photos avec des amis, nous – le grand public, les scientifiques, la presse – devons nous assurer que les principes de la Toile restent intacts, non seulement pour préserver l'acquis, mais aussi pour profiter des avancées à venir.

Plusieurs principes sont essentiels pour garantir cet avenir. Le premier est l'universalité du Web. Quand vous créez un lien, vous pouvez vous lier à n'importe quoi. Cela signifie que l'on doit pouvoir mettre sur la



Toile ce que l'on veut, quel que soit l'ordinateur, le logiciel utilisé ou la langue parlée, que la connexion soit filaire ou non. Il doit fonctionner avec des informations de toute forme et de toute qualité, qu'il s'agisse d'un tweet anodin ou d'un article académique. Et le Web doit être accessible depuis tout type de matériel conçu pour se connecter à Internet.

Le caractère décentralisé est une autre propriété importante. Nul besoin de l'approbation d'une autorité centrale pour ajouter une page Web ou un lien. Il suffit d'utiliser

trois protocoles standards simples : écrire une page au format HTML (*hypertext markup language*), la nommer avec la convention de nommage URI et la mettre sur Internet au moyen de HTTP (*hypertext transfer protocol*). C'est le caractère décentralisé du Web qui a rendu et rendra possible l'innovation à une vaste échelle.

L'URI est la clef de l'universalité (j'ai initialement donné le nom d'URI au système de nommage, pour *Universal Resource Identifier*, identifiant universel de ressource ; on parle maintenant d'URL, pour *Uniform Resource Locator*, localisateur uniforme de ressource ; les URL sont une sous-classe d'URI). L'URI permet de suivre n'importe quel lien, indépendamment du contenu auquel il mène ou de qui le publie. Ces liens transforment le contenu de la Toile en un espace d'informations interconnectées.

Or l'universalité de la Toile est aujourd'hui menacée de plusieurs façons. Les compagnies de télévision câblée qui louent un accès à Internet envisagent de limiter les téléchargements de leurs clients au bouquet de divertissements proposé par la compagnie.

Les réseaux sociaux posent un problème différent. Facebook, LinkedIn et d'autres créent de la valeur en emmagasinant l'information que vous donnez (date de naissance, adresse électronique, ce que vous aimez, etc.) et en indiquant qui est ami avec qui, et qui est sur quelle photo. Ils assemblent ces bribes d'information en d'extraordinaires bases de données et les réutilisent pour fournir des services à valeur ajoutée, mais seulement au sein de leur site. Chaque site est comme un silo, bien isolé des autres. Oui, les pages de votre site sont sur la Toile, mais pas vos données. Vous pouvez accéder à une page Web contenant une liste de personnes que vous y avez créées, mais vous ne pouvez pas envoyer cette liste, ou une partie de ses éléments, vers un autre site.

Cet isolement est possible parce qu'il n'existe pas une URI pour chaque morceau d'information. Les liens entre données n'existent qu'au sein d'un même site. Par conséquent, plus vous y entrez de données, plus vous êtes enfermé. Votre site de réseau social devient une plate-forme centrale, un silo de contenu fermé, qui ne vous donne

pas un contrôle total sur l'information qu'il renferme. Plus les architectures de ce type se répandront, plus le Web se fragmentera, et moins nous pourrions bénéficier d'un espace d'information unique et universel.

Un danger apparenté est qu'un site de réseau social (ou un moteur de recherche, ou un navigateur) grossisse au point de créer une situation de monopole, ce qui freinerait l'innovation. Comme cela a été le cas depuis les débuts du Web, la poursuite de l'innovation par la base serait le meilleur rempart contre les tentatives d'un gouvernement ou d'une entreprise de saper l'universalité. Ainsi, *GNU Social* et *Diaspora* sont des projets qui permettent à toute personne de créer son propre réseau social à partir de son propre serveur, en se connectant à n'importe quel autre site. De même, le projet *Status.net*, grâce auquel ont été installés des sites tels que *identi.ca*, permet de gérer son propre réseau de type *Twitter* sans la centralisation de *Twitter*.

Des normes ouvertes

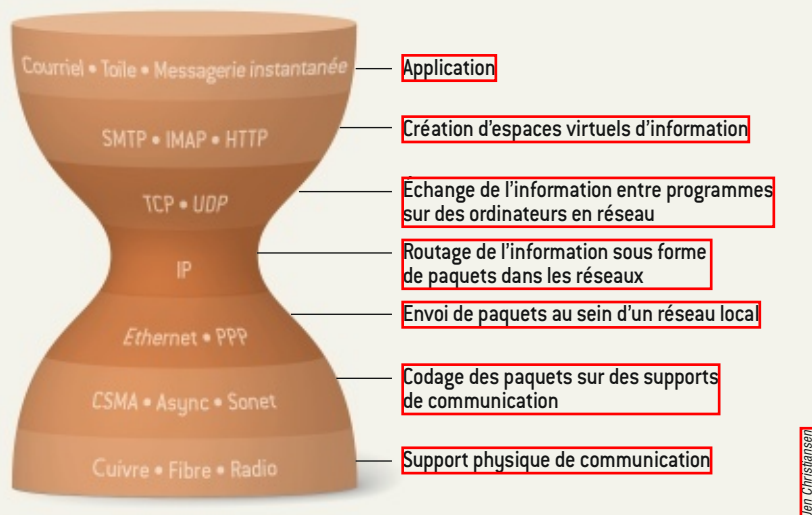
Permettre à tout site de se lier à tout autre est nécessaire pour avoir une Toile robuste, mais pas suffisant. Les logiciels de base dont les individus et les entreprises ont besoin pour développer des services puissants sur le Web doivent être disponibles gratuitement, sans droits à payer. L'entreprise *Amazon.com*, par exemple, est devenue une énorme librairie en ligne, s'est mise à vendre de la musique puis toutes sortes de biens parce qu'elle avait libre accès aux normes techniques de la Toile. *Amazon.com*, comme tout autre utilisateur du Web, a pu utiliser HTML, URI et HTTP sans demander la permission à personne et sans rien avoir à payer. Elle a aussi pu utiliser les améliorations de ces normes développées par le Consortium du Web, qui permettent aux clients de remplir un bon de commande virtuel, de payer en ligne, d'attribuer une note aux biens achetés, et ainsi de suite.

J'utilise l'expression « normes ouvertes » pour signifier des normes à la conception desquelles tout spécialiste peut participer, qui ont été largement reconnues comme acceptables, qui sont disponibles gratuitement sur



Web ou Internet ?

Le Web est, comme la messagerie instantanée, une application qui tourne sur Internet. Ce dernier est un réseau électronique qui rassemble les informations des applications en paquets et les achemine vers les ordinateurs au moyen de supports filaires ou non, selon des protocoles (règles) simples désignés par divers acronymes. On peut se représenter Internet et les applications comme une pile de couches conceptuelles, chaque couche utilisant les services de celle du dessous. Les applications sont comparables à des appareils électriques qui exploitent de façon standardisée le réseau électrique.



la Toile et libres de droits pour les développeurs et les utilisateurs. La riche diversité des sites Web tient à de telles normes ouvertes et à leur facilité d'utilisation.

L'ouverture signifie aussi que l'on peut construire son propre site Web ou son entreprise en ligne sans l'approbation de personne. Aux débuts du Web, je n'avais pas à obtenir d'autorisation ni à payer de droits pour utiliser les normes ouvertes d'Internet, tels les protocoles de communication bien connus TCP (*transmission control protocol*) ou IP (*Internet protocol*). De même, selon la politique de brevets libres de droits du Consortium du Web, les entreprises, universités et individus qui contribuent au développement d'une norme doivent s'engager à ne pas faire payer de droits à ses utilisateurs.

Des normes ouvertes et libres de droits n'empêchent pas une entreprise ou un individu de créer un blog ou un programme de partage de photos et d'en faire payer l'utilisation. L'idée est que des normes ouvertes autorisent de nombreuses options, certaines gratuites et d'autres pas.

De fait, beaucoup d'entreprises développent des applications précisément parce qu'elles ont l'assurance que ces applications fonctionneront pour tous, quels que soient l'ordinateur, le système d'exploitation ou le fournisseur d'accès à Internet. La même certitude encourage les scientifiques à passer des milliers d'heures pour mettre au point d'énormes bases de données, par exemple pour partager de l'information sur les protéines dans l'espoir de guérir des maladies. Elle encourage des gouvernements à mettre toujours plus de données en ligne, ce qui améliore la transparence de l'administration. Les normes ouvertes favorisent aussi la création fortuite : comme on le découvre tous les jours sur le Web, un utilisateur quelconque peut avoir l'idée de s'en servir d'une façon que nul n'avait imaginée auparavant.

À l'inverse, la non-utilisation de normes ouvertes crée des mondes clos. Le système *iTunes* d'*Apple*, par exemple, identifie les chansons et les vidéos au moyen d'URI ouvertes. Mais au lieu de « http », les adresses commencent par « itunes », qui

est propriétaire. Vous ne pouvez accéder à un lien « itunes: » qu'en utilisant le programme propriétaire *iTunes* d'*Apple*. Vous ne pouvez pas créer de lien vers d'autres informations du monde *iTunes* [une chanson ou des renseignements sur un groupe]. Vous n'êtes plus sur le Web. Le monde *iTunes* est centralisé et à part. Vous êtes piégé dans un magasin unique, plutôt que d'être sur un marché ouvert.

D'autres entreprises sont également en train de créer des mondes clos. La tendance des magazines à produire des applications pour le téléphone plutôt que pour le Web est inquiétante, car ces éléments sont en dehors de la Toile. On ne peut pas leur assigner un marque-page ou envoyer un lien vers l'une de leurs pages. On ne peut pas les tweeter. Il vaudrait mieux concevoir des applications Web qui fonctionneront aussi sur les navigateurs des téléphones, et les techniques pour ce faire ne cessent de s'améliorer.

Certains ne voient pas en quoi les mondes clos posent problème : ils sont faciles à utiliser et semblent leur procurer ce dont ils ont besoin. Mais comme on l'a vu dans les années 1990 avec le système d'*America Online* (AoL) qui ne donnait accès qu'à un sous-ensemble de la Toile, ces « jardins clos » ont beau être pleins d'agréments, ils ne peuvent rivaliser, en termes de diversité, de richesse et d'innovation, avec le marché débordant de vitalité de la Toile. Et si un jardin clos a trop de prise sur un marché, il peut entraver son essor.

Garder la distinction entre Web et Internet

En vertu d'un troisième principe, la séparation des couches, l'architecture du Web doit rester distincte de celle d'Internet. Cette séparation est fondamentale. Le Web est une application qui tourne sur Internet, réseau électronique qui transmet des paquets d'information entre des millions d'ordinateurs en suivant quelques protocoles ouverts.

Le Web est un peu analogue à un appareil électroménager branché sur le réseau électrique. Un réfrigérateur ou une imprimante peut fonctionner à condition d'utiliser quelques protocoles standards, par exemple

fonctionner à 120 volts et 60 hertz aux États-Unis. De même, toute application (notamment le Web, le courriel ou les messageries instantanées) peut fonctionner sur Internet à condition d'utiliser quelques protocoles Internet standards, comme TCP et IP.

Les fabricants peuvent améliorer les réfrigérateurs et les imprimantes sans altérer la façon dont le réseau d'électricité fonctionne, et l'on peut améliorer le réseau électrique sans modifier le fonctionnement de ces appareils. Les deux couches technologiques fonctionnent ensemble, mais se modernisent indépendamment. Il en est de même pour le Web et Internet. En 1990, le Web s'est déployé sur Internet sans rien devoir changer à ce dernier, et il en a été de même pour toutes les améliorations depuis. Et les connexions d'Internet sont passées de 300 bits par seconde à 300 millions de bits par seconde sans que la Toile ait à être repensée.

Des droits de l'homme électroniques

Bien que les architectures d'Internet et du Web soient distinctes, un utilisateur de la Toile est aussi un internaute et a donc besoin d'un Internet qui n'interfère pas avec le Web. Au début du Web, il était trop difficile techniquement pour une entreprise ou un État d'interférer avec un utilisateur particulier de la Toile en manipulant Internet. Mais les techniques ont évolué...

En 2007, *BitTorrent*, une société dont le protocole de réseau « pair à pair » permet de partager de la musique, des vidéos et autres fichiers directement sur Internet, s'est ainsi plainte à la Commission fédérale des communications, aux États-Unis, que le géant *Comcast* (un fournisseur d'accès à Internet) bloquait ou ralentissait le débit pour les abonnés utilisant l'application *BitTorrent*. Mais en avril 2010, un tribunal fédéral a décrété que la Commission fédérale des communications ne pouvait pas contraindre *Comcast* à mettre fin à sa pratique. Un bon fournisseur d'accès gère souvent le trafic en sacrifiant les échanges peu importants quand la bande passante est réduite, et cela en toute transparence, afin que les utilisateurs soient au courant. Mais il y a une ligne à ne

pas franchir entre ces pratiques de gestion et l'utilisation des mêmes méthodes à des fins discriminatoires.

Cette distinction met en lumière le principe dit de neutralité d'Internet : si j'ai payé pour avoir une connexion Internet d'une certaine qualité, disons 300 mégabits par seconde, et que vous avez payé pour cette même qualité, alors les communications entre nous devraient se faire à ce niveau de qualité. Selon ce principe, un puissant fournisseur d'accès à Internet ne pourra pas vous envoyer des vidéos d'une société de médias qu'il détient à 300 mégabits par seconde et vous envoyer les vidéos d'une compagnie concurrente avec un débit beaucoup plus faible. Cela reviendrait à de la discrimination commerciale. Imaginez que votre fournisseur d'accès vous facilite la connexion vers un certain magasin en ligne de chaussures, et vous freine pour atteindre les autres, ou qu'il vous rende difficile l'accès aux sites Web de certains partis politiques,

de certaines religions, ou à des sites sur la théorie de l'évolution...

Mais en août 2010, *Google* et le fournisseur d'accès *Verizon* ont suggéré que la neutralité du Web ne devrait pas s'appliquer aux connexions des téléphones portables. Or beaucoup d'habitants des zones rurales, dans divers pays, n'ont accès à Internet que par l'intermédiaire de téléphones portables ; dispenser le sans-fil de la neutralité du Web exposerait ces utilisateurs à des discriminations de service. Il est également bizarre d'imaginer que mon droit fondamental à accéder à la source d'information de mon choix s'appliquerait quand j'utilise mon ordinateur connecté à mon WiFi à domicile, mais pas quand j'utilise mon téléphone portable.

Un moyen de communication neutre est la base d'une économie de marché compétitive mais juste, de la démocratie et de la science. Le débat a resurgi l'année dernière pour savoir si le gouvernement doit légiférer pour protéger la neutralité du Web.

Le Web de demain en action

S'appuyant sur les principes fondateurs du Web, plusieurs tendances intéressantes promettent de changer le fonctionnement du monde en ligne et d'avoir un impact sur le monde extérieur.

DONNÉES OUVERTES

En mettant des données sur la Toile et en les reliant, on offre de nouvelles fonctionnalités dynamiques partout, à tout le monde. On a ainsi mis en évidence la discrimination dans l'Ohio et assisté les équipes de secours à Haïti après le grand séisme de janvier 2010.

LA SCIENCE DU WEB

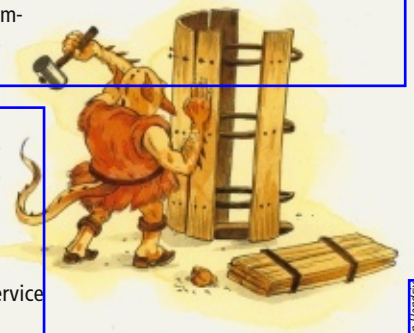
On commence seulement à comprendre comment la Toile reflète le monde réel et le façonne. La nouvelle discipline qu'est la science du Web apporte un éclairage sur l'architecture de la Toile, son fonctionnement et son impact sur la société.

MACHINES SOCIALES

Beaucoup de personnes postent des critiques et des notes sur les restaurants, qui influencent les choix des futurs clients potentiels. Cette activité est un exemple de machine sociale. Des machines sociales plus complexes, en cours d'élaboration, pourraient améliorer la pratique scientifique ou la démocratie.

BANDE PASSANTE GRATUITE

Peu d'habitants des pays en développement peuvent s'offrir un accès à Internet. Un service gratuit à très petite bande passante pourrait contribuer à améliorer l'éducation, la santé et l'économie de ces régions, tout en encourageant certaines personnes à passer à un service payant plus rapide.



L'AUTEUR



Le Britannique Tim BERNERS-LEE est l'inventeur du Web. Il dirige le *World Wide Web Consortium*, basé à l'Institut de technologie du Massachusetts (MIT), aux États-Unis. Il est aussi professeur d'ingénierie au MIT et professeur d'électronique et d'informatique à l'Université de Southampton, en Angleterre.

La réponse est oui. Bien qu'Internet et la Toile prospèrent généralement en l'absence de régulation, certaines valeurs fondamentales doivent être protégées par la loi.

Pas d'espionnage

D'autres menaces sur la Toile viennent des diverses formes d'indiscrétion, entre autres la surveillance de trafic. En 2008, la Société *Phorm* a mis au point un moyen pour le fournisseur d'accès de déterminer toutes les URI que visite un usager donné. Le fournisseur d'accès pouvait ainsi créer un profil des sites visités par l'utilisateur afin de produire des publicités ciblées.

Or cela équivalait à mettre un téléphone sur écoute ou à ouvrir le courrier postal. Les URI que les gens utilisent révèlent bien des choses. Par exemple, une entreprise ayant acheté les profils URI des candidats à un poste

position, le Conseil constitutionnel a exigé en octobre un examen au cas par cas par un juge avant que l'accès à Internet soit coupé ; mais si la décision est entérinée, la déconnexion pourrait signifier pour le foyer une perte de libertés individuelles.

Au Royaume-Uni, le *Digital Economy Act*, passé à la va-vite en avril 2010, permet au gouvernement d'ordonner à un fournisseur d'accès à Internet de couper la connexion de quiconque apparaît sur une liste d'individus soupçonnés d'atteinte aux droits d'auteur. En septembre 2010, le Sénat américain a introduit le COICA (*Combating Online Infringement and Counterfeits Act*, loi contre les infractions en ligne et la contrefaçon) qui permettrait au gouvernement de créer une liste noire de sites Web accusés d'infraction, et de faire pression ou d'obliger tous les fournisseurs d'accès à bloquer l'accès à ces sites.

Dans ces cas, aucune clause de sauvegarde des libertés individuelles ne protège les gens avant qu'ils soient déconnectés ou que leurs sites soient bloqués. Étant donné le rôle crucial du Web dans notre quotidien et notre travail, cette déconnexion est une forme de privation de liberté. Nous devrions exiger qu'aucune personne ni organisation ne soient privées de la capacité à se connecter aux autres sans clause de sauvegarde des libertés individuelles et de respect de la présomption d'innocence.

Tant que les principes fondamentaux de la Toile seront respectés, son évolution ne reposera pas dans les mains d'une seule personne ou organisation. Dans ce cas, le Web promet des fonctionnalités extraordinaires, notamment en termes d'accès sans fil, via les téléphones portables par exemple.

Un bon exemple de promesse d'avenir est celui des données liées. Le Web d'aujourd'hui permet à ses usagers de publier et de découvrir des documents, mais nos programmes informatiques ne peuvent directement lire ou manipuler les données contenues à l'intérieur de ces documents. Quand ce problème sera résolu, la Toile deviendra beaucoup plus utile, car dans toutes ces données sont enfouies des connaissances de nature à guérir des maladies, à créer de la valeur marchande, à améliorer l'efficacité des procédés.

TANT QUE LES PRINCIPES FONDAMENTAUX du Web seront respectés, son évolution ne reposera pas dans les mains d'une seule personne ou organisation.

pourrait recruter en tenant compte des opinions politiques ; des compagnies d'assurance pourraient défavoriser les clients ayant cherché de l'information sur les maladies cardiaques ; et ainsi de suite.

La liberté d'expression aussi devrait être protégée. La Toile devrait être comme une feuille de papier vierge : prête à être remplie, sans contrôle sur ce qui est écrit. En 2010, *Google* a accusé le gouvernement chinois de pirater ses bases de données pour extraire les courriels des dissidents. Ces infractions présumées ont eu lieu après que *Google* a résisté aux demandes du gouvernement de censurer certains documents sur son moteur de recherche en chinois.

Les gouvernements totalitaires ne sont pas les seuls à violer, dans ce domaine, les droits de leurs citoyens. En France, la loi Hadopi adoptée en 2009 a autorisé une agence du même nom à suspendre pendant un an la connexion à Internet d'un foyer si une compagnie de médias suspecte qu'une personne de ce foyer a illégalement téléchargé de la musique ou des vidéos. Après beaucoup d'op-

✓ SUR LE WEB

Le *World Wide Web Consortium* : www.w3.org

La *World Wide Web Foundation* : www.webfoundation.org

La *Web Science Research Initiative* : www.webscience.org

Notes de T. Berners-Lee sur la conception du Web et autres thèmes : www.w3.org/DesignIssues

Organisation de défense des droits des citoyens sur Internet : www.laquadrature.net

Les scientifiques sont en première ligne de certaines grandes initiatives visant à mettre des données liées sur la Toile. Les chercheurs, par exemple, constatent souvent qu'il n'existe aucun laboratoire ou banque de données en ligne qui soit suffisant pour découvrir de nouveaux médicaments. L'information nécessaire pour comprendre les interactions complexes entre les maladies, les processus biologiques du corps humain et la vaste panoplie d'agents chimiques est éparpillée à travers le monde dans une myriade de bases de données, de tableurs et de documents.

Un exemple encourageant concerne la lutte contre la maladie d'Alzheimer. Un certain nombre de laboratoires de recherche privés et publics ont pour une fois accepté d'ouvrir leurs données et ont créé l'ADNI (*Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative*, initiative

d'imagerie cérébrale pour la maladie d'Alzheimer). Ils ont posté sous forme de données liées une énorme quantité de scanners cérébraux et d'informations sur les patients, données dans lesquelles les chercheurs ont puisé à de nombreuses reprises.

Lier les données

Dans une démonstration à laquelle j'ai assisté, un scientifique posait la question suivante : « Quelles sont les protéines impliquées dans la transduction des signaux et qui sont liées aux neurones pyramidaux ? » Soumise à *Google*, la question ramenait 233 000 résultats, et pas une seule réponse. Mais quand on posait la question dans les bases de données liées, on obtenait en retour un petit nombre de protéines ayant les propriétés indiquées.

Les données liées soulèvent des questions, notamment en termes de respect de la vie privée. Il nous faudra examiner les options légales, culturelles et techniques qui respecteront la vie privée sans remettre en cause les avantages des nouvelles capacités de partage.

Les développeurs de la Toile, les entreprises, les gouvernements et les citoyens devraient coopérer ouvertement, comme on l'a fait jusqu'ici, pour préserver les principes fondamentaux de la Toile, ainsi que ceux d'Internet, en s'assurant que les protocoles techniques et les conventions sociales mis en place respectent les valeurs humaines essentielles. L'objectif du Web est de servir l'humanité. Nous le construisons maintenant afin que nos successeurs aient les moyens de créer des choses qui dépassent notre imagination. ■

sf
BORDEAUX 2011

UNIVERSITÉ BORDEAUX 1
Sciences Technologiques

CONGRES GENERAL de la Société Française de Physique

ENSEIRB-MATMECA
Campus de Talence
Université de Bordeaux

Du 4 au 8 juillet 2011

www.sfp2011.fr

Président du Comité Scientifique
Alain Fontaine

Président du Comité d'Organisation
Simon Villain-Guilot

AQUITAINE

cnrs

cea

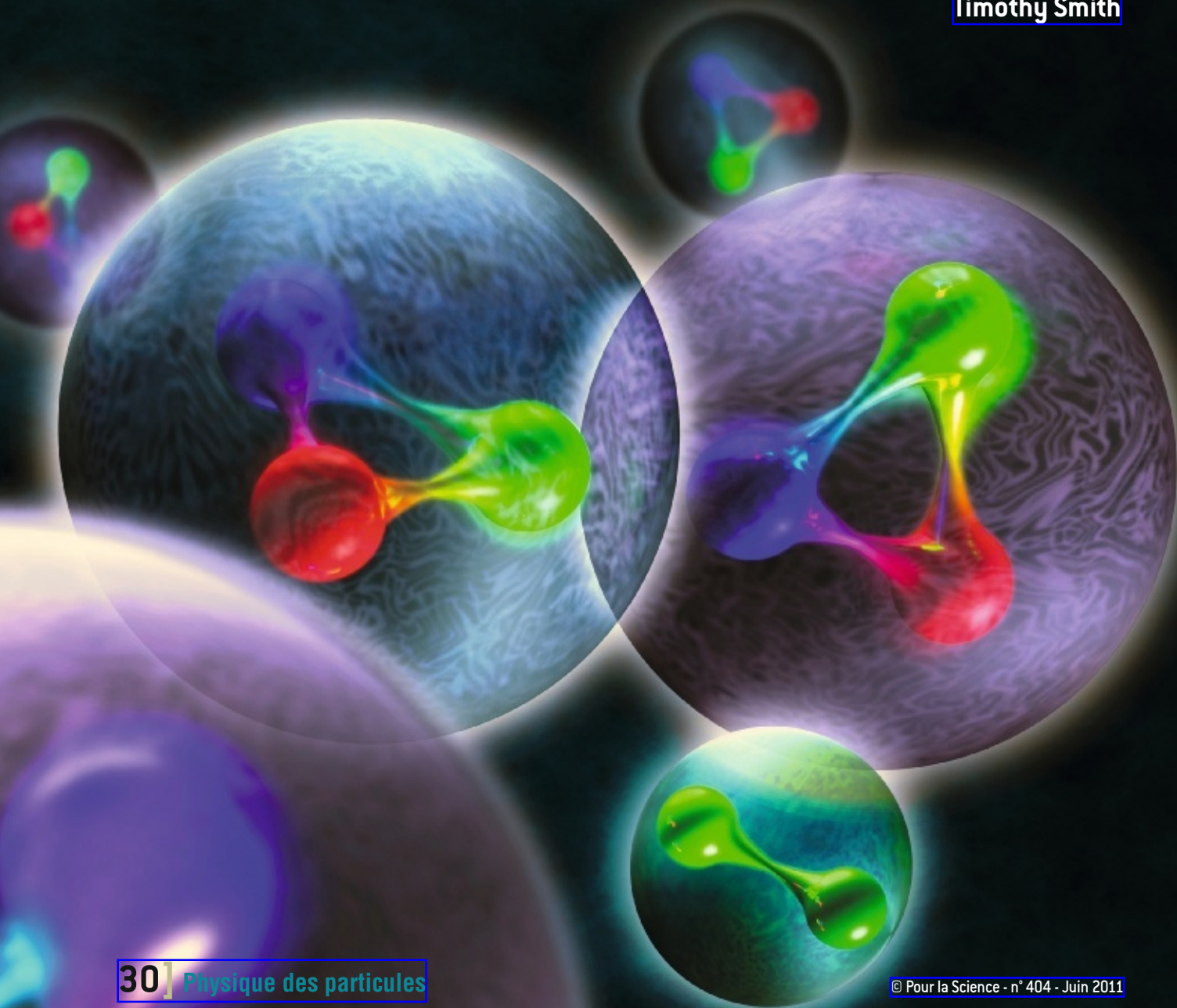
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche

L'anatomie du

NEUTRON

Le neutron est plus structuré qu'on ne le pensait. Des collisions avec des électrons accélérés permettent d'étudier la répartition des quarks au sein de cette particule, et révèlent que ces charges ne sont pas distribuées uniformément.

Timothy Smith



Un atome est constitué de trois types de particules. Les électrons, chargés négativement, orbitent autour du noyau atomique, rappelant les planètes du Système solaire; ils évoluent à des vitesses de l'ordre de dix pour cent de la vitesse de la lumière, environ égale à 300 000 kilomètres par seconde. Les protons sont des particules du noyau, chargées positivement, près de 2 000 fois plus massives que les électrons. Ces deux types de particules déterminent la forme, la dynamique et les propriétés chimiques de l'atome. Enfin, les neutrons, eux aussi des constituants du noyau, ne portent aucune charge, et semblent être les spectateurs passifs de la mécanique atomique. Pourtant, ils ont bel et bien une vie propre. En témoigne l'effervescence qui règne à leurs surfaces, d'où jaillissent des particules, et dans leurs cœurs, qui contiennent des particules encore plus fondamentales: les quarks et les gluons.

Pour étudier les neutrons, il nous faut observer la matière à une échelle 100 000 fois plus petite que la taille de l'atome. Prenons un globule rouge, qui mesure 0,010 millimètre: il est environ 100 000 fois plus petit que l'être humain qui l'abrite. Chaque globule rouge est constitué d'atomes 100 000 fois plus petits, et les neutrons (comme les protons) sont encore 100 000 fois plus petits. Leur diamètre est de l'ordre du femtomètre (10^{-15} mètre, soit un milliardième de milliardième de mètre), ou fermi, du nom du physicien Enrico Fermi. Pour revenir à des dimensions plus habituelles, c'est comme si une orange – le noyau – était posée seule en plein Paris – l'atome –, quelques électrons se déplaçant sur le périphérique. L'essentiel d'un atome est ainsi constitué de vide.

Protons et neutrons sont nommés nucléons. Dans le noyau, ils sont très proches, arrangés un peu comme des oranges et des pommes sur un étal de marché. Ils ont de nombreuses caractéristiques similaires, notamment leur taille et leur masse. Un nucléon ayant un diamètre égal à 1,7 fermi, un gros noyau tel celui de l'uranium 238, contenant 238 nucléons, a un diamètre d'environ 15 fermis.

Dans l'atome le plus simple, l'hydrogène, un seul électron cohabite avec le noyau, constitué d'un seul proton: le neutron est en option. Après l'hydrogène, le type d'atome le plus simple est l'hélium 3, l'un des isotopes de l'hélium;

il est constitué de deux électrons, deux protons et un neutron (deux isotopes ont le même nombre de protons, mais un nombre de neutrons différent). Sans le neutron, le noyau d'hélium 3 se désintégrerait sous l'effet de la répulsion électrostatique entre les deux protons de charge positive. En isolant les protons, les neutrons assurent la stabilité des noyaux des atomes.

Si on les retrouve dans presque tous les éléments – à l'exception de l'hydrogène –, les neutrons font pâle figure face aux protons. N'interagissant que dans un court rayon d'action, ils semblent ne pas servir à grand-chose. Alors que les deux protons de l'hélium 3 retiennent les électrons tout en se repoussant l'un l'autre, le neutron serait simplement posté entre les protons. Pourtant, contrairement aux apparences, le neutron n'est pas qu'un spectateur de la danse atomique: il joue, comme nous allons le voir, un rôle essentiel.

Plongée à l'intérieur du neutron

Depuis presque 60 ans, les physiciens sondent les protons et les neutrons, cherchant à mesurer leur taille et à caractériser l'interaction nucléaire à courte portée qui assure la cohésion du noyau. Il y a 45 ans a émergé l'idée que les nucléons sont constitués de petites particules nommées quarks et gluons. Reste à comprendre comment ces quarks s'assemblent au sein des nucléons. Forment-ils, comme les électrons dans un atome, des systèmes planétaires en orbite? Ou s'associent-ils en un mélange amorphe?

Pour compliquer le tout, personne n'a jamais observé un quark isolé, et personne n'espère en observer un. Malgré ces obstacles, les physiciens reconstruisent pièce par pièce l'anatomie du neutron.

Le mot «neutron» a été utilisé pour la première fois en 1899, afin de décrire la combinaison d'un électron négatif et d'un électron positif, dont on soupçonnait l'existence dans l'«éther». Ce n'est qu'en 1932 que le physicien britannique James Chadwick identifie le neutron, libéré lors du bombardement d'un atome par des particules alpha (qui se révéleront plus tard être des noyaux d'hélium 4).

En 1935, la physique du neutron, particule électriquement neutre liée aux autres neutrons et aux protons par une force nucléaire à courte portée, se précise.

1. UN NOYAU ATOMIQUE est constitué de protons, de charge électrique positive, et de neutrons, neutres. Ils sont tous constitués de trois particules fondamentales nommées quarks. Ces quarks portent une charge électrique, ainsi qu'une charge de couleur à l'origine de l'interaction nucléaire forte, et un spin magnétique. L'équilibre entre ces trois propriétés détermine la répartition des quarks au sein de la particule.

L'ESSENTIEL

- ✓ Le neutron est constitué de deux quarks *d* et de un quark *u*.
- ✓ Le quark *u* a une charge $+2/3$ et le quark *d* une charge $-1/3$.
- ✓ Bien que le neutron soit globalement neutre, sa densité de charge n'est pas uniforme.
- ✓ On étudie cette densité grâce à des collisions entre neutrons et électrons accélérés.

Olivier HERNANDEZ

Hideki Yukawa, de l'Université d'Osaka au Japon, s'intéressait alors à la cohésion des nucléons dans le noyau. L'interaction nucléaire diffère des interactions gravitationnelle et électromagnétique : elle n'agit qu'à très courte portée. Pour rendre compte de cette interaction, Yukawa supposa l'existence d'une nouvelle famille de particules, les mésons, parcourant les très petites distances qui séparent les nucléons pour assurer leur cohésion. Bien que le premier méson, le pion, n'ait été observé qu'une dizaine d'années plus tard, d'éminents physiciens comme Werner Heisenberg et Enrico Fermi, convaincus par le raisonnement de Yukawa, ont conçu une « théorie des champs de mésons » complète. Ainsi, dans les années 1950, il était admis que les nucléons sont entourés d'un nuage de pions, sans cesse créés puis absorbés par les neutrons et les protons du noyau.

On a longtemps utilisé des sources radioactives pour étudier protons et neutrons, et les premiers pions ont été observés dans les rayons cosmiques. Après la Seconde Guerre mondiale, un nouvel outil a été développé pour sonder la matière : l'accélérateur de particules. Les particules, propulsées à grande vitesse grâce à d'intenses champs électromagnétiques, sont confinées dans un faisceau étroit, dont l'énergie est directement reliée au pouvoir de résolution de l'accélérateur.

Ainsi, un accélérateur produisant un faisceau d'électrons de un mégaelectronvolt peut sonder des détails de la matière 1 000 fois plus petits qu'un atome. Pour un faisceau de un gigaelectronvolt, 1 000 fois plus énergétique, on parvient à scruter des longueurs de un fermi environ. En 1951, l'accélérateur de l'Université Stanford réussit à produire un faisceau

d'électrons de 600 mégaelectronvolts, permettant d'atteindre une résolution suffisante pour « voir » pour la première fois les neutrons et les protons.

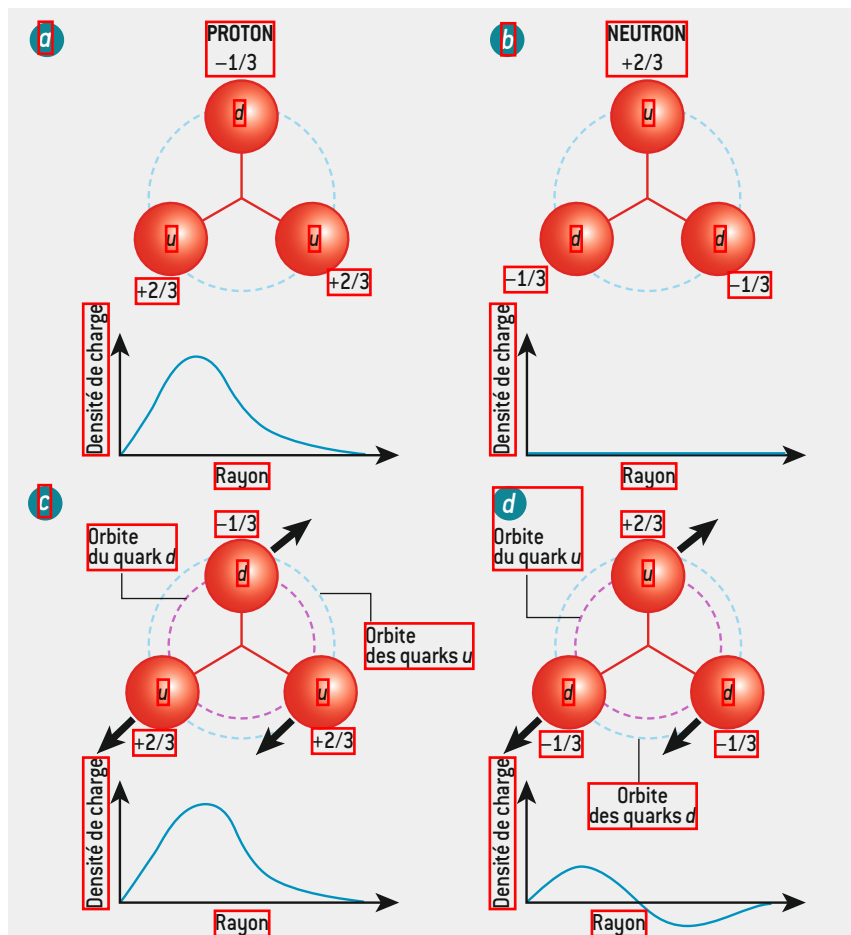
Un accélérateur ne « voit » pas vraiment le nucléon : il permet de mesurer la section efficace de la réaction électron-nucléon, c'est-à-dire la probabilité que l'électron propulsé par l'accélérateur interagisse avec le nucléon cible, l'électron incident étant renvoyé avec un angle et une énergie donnés. Simultanément, des physiciens théoriciens ont calculé les probabilités de diffusion de l'électron par le nucléon. En comparant ces prévisions théoriques aux résultats expérimentaux, ils ont pu déterminer la théorie la mieux adaptée aux données obtenues grâce à l'accélérateur de particules.

L'expression mathématique de la section efficace fait intervenir deux grandeurs distinctes : la diffusion électrique et la diffusion magnétique. En effet, les électrons du faisceau diffusent électriquement, à cause de leur charge, mais aussi magnétiquement, en raison de leur spin (ils peuvent interagir comme deux petites barres aimantées). On nomme ces deux grandeurs facteur de forme électrique et facteur de forme magnétique. En jouant sur les énergies du faisceau et les angles de détection, les physiciens parviennent à distinguer les deux phénomènes et à démêler la structure du nucléon.

Premières mesures

Au milieu des années 1950, Robert Hofstadter utilisa l'accélérateur de l'Université Stanford pour diriger son faisceau d'électrons sur une cible d'hydrogène. À des énergies de quelques centaines de mégaelectronvolts, les électrons interagissent peu avec les électrons des atomes d'hydrogène, lesquels se comportent donc quasiment comme des protons. Hofstadter parvint à déterminer les facteurs de forme du proton et évalua les rayons électrique et magnétique du proton à environ 0,8 fermi. Ces rayons correspondent à la distance en deçà de laquelle les interactions électrique et magnétique deviennent fortes : ils définissent la surface de diffusion des électrons par le proton.

Les mesures sur le neutron sont plus difficiles à réaliser, car nous ne disposons pas de cibles composées uniquement de neutrons. Cependant, nous pouvons mesurer la section efficace d'un deutéron, le noyau d'un atome de deutérium, isotope



2. DANS LE MODÈLE DES QUARKS le plus simple (en haut), les charges des quarks u et des quarks d du proton (a) s'additionnent pour donner $+1$, et la particule a un rayon électrique de 0,8 fermi. Pour le neutron, la somme des charges des quarks vaut zéro (b), et la densité de charge est nulle partout. En prenant en compte leurs spins (en bas, flèches noires), on introduit une répulsion entre les quarks dont les spins sont parallèles, si bien que ceux-ci ont des orbites légèrement modifiées. Dans le cas du proton, l'effet sur le rayon électrique (c) n'est pas sensible. Pour le neutron, cela conduit à une périphérie légèrement négative et un cœur légèrement positif (d).

de l'hydrogène. Le deutéron contient un proton et un neutron, assez peu liés. En mesurant la section efficace du deutéron et en soustrayant la section efficace du proton, on déduit la section efficace d'un neutron, à quelques ajustements près.

De cette façon, Hofstadter a également déterminé le rayon magnétique du neutron : 0,8 fermi, quasi identique à celui du proton. L'expérience donna un rayon électrique nul, résultat en accord avec le fait que le neutron est dépourvu de charge.

Notre vision de l'intérieur des protons, neutrons et autres pions a radicalement changé en 1964, année où Murray Gell-Mann, de l'Institut de technologie de Californie, et George Zweig, de l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (le CERN), ont chacun proposé un modèle faisant intervenir de nouvelles particules : les quarks. Dans ce cadre, des particules lourdes (protons, neutrons, et d'autres particules exotiques), regroupées dans la famille des baryons, sont constituées de trois quarks. Les mésons (les particules de masses intermédiaires, tels les pions) sont formés d'une paire quark-antiquark (les antiquarks sont des particules d'antimatière qui ont les mêmes propriétés que les quarks, telles que leur charge ou leur couleur, mais de signe opposé). Les particules légères, comme les électrons, sont des particules fondamentales qui ne sont pas composées de quarks : ce sont des leptons.

Saveurs et couleurs des quarks

Il existe six types de quarks, six « saveurs ». La plupart des particules (en particulier les plus courantes, évoquées ici) sont composées des deux saveurs de quarks les plus légères : les quarks *u* ou *up* (haut) et *d* ou *down* (bas). Ce modèle, qui présente l'intérêt de pouvoir décrire une multitude de particules avec seulement six types de particules, est au cœur de la chromodynamique quantique. Le terme fait référence aux « couleurs » des quarks, une autre de leurs propriétés. C'est aujourd'hui la meilleure théorie pour décrire les particules à l'échelle du nucléon et en deçà.

Le proton est composé de deux quarks *u* et de un quark *d* (on le note souvent *uud*), tandis que le neutron est constitué de deux quarks *d* et de un quark *u* (noté *udd*). Ces quarks *u* et *d* sont dits quarks de valence : ils confèrent aux particules leurs propriétés, telle la charge. Des gluons

participent à la cohésion des quarks, comme le font les pions pour les nucléons : ils sont une sorte de glu à quarks. À l'intérieur du nucléon existe une mer de quarks où se forment d'éphémères paires quark-antiquark. Le tableau complet de la chromodynamique quantique, décri-

LES EFFETS CONJUGUÉS DES SPINS et des charges de couleur modifient les orbites des quarks, qui ne sont pas répartis uniformément dans le neutron.

vant ce qui se passe à l'intérieur du nucléon, est difficile à dresser ; c'est pourquoi les physiciens se concentrent sur les quarks de valence pour décrire les nucléons dans le cadre du modèle des quarks constituants (CQM pour *Constituent Quark Model*).

Étant donné que les protons ont une charge +1 (l'unité étant la charge du proton) et les neutrons une charge nulle, on en déduit que les quarks *u* ont une charge égale à +2/3 et les quarks *d* à -1/3. Dans le modèle CQM, les trois quarks formant le nucléon sont en orbite à la même distance du centre du groupe. Pour le proton, les rayons électrique et magnétique, qui dépendent des orbites des quarks *uud* et de leurs spins, sont en accord avec les résultats obtenus par Hofstadter. La situation du neutron est différente. Son rayon magnétique, déterminé par la position moyenne des quarks, est non nul. Quant à son rayon électrique, il devrait s'annuler : les charges des quarks *u* et *d* devraient s'équilibrer quelle que soit la distance au centre du groupe puisque la charge du neutron est nulle. Mais...

Les quarks, comme les électrons, portent un spin. Cette propriété quantique fait ressembler ces particules à des balles en rotation autour de leur axe. Assimilons le quark à une boule de billard : lorsque celle-ci touche la bande, elle est déviée, et cette déviation dépend de l'effet (du spin) que l'on donne à la boule (au quark). Les mathématiques décrivant l'interaction de boules en rotation aident à décrire les particules dotées d'un spin. L'orientation du spin a son importance : les particules interagissent différemment selon les orientations de leurs spins.

Les quarks ont également une *charge de couleur*. L'interaction forte qui en résulte est bien supérieure (de deux ordres de grandeur) à la force électrique qui s'exerce entre les charges électriques des quarks. D'après le principe d'exclusion de Pauli, si deux

Glossaire

✓ **Baryon** : les neutrons et les protons appartiennent à la famille des baryons, particules constituées de trois quarks.

✓ **Quarks** : ces particules sont des constituants élémentaires de la matière, et ne peuvent être scindées en particules plus petites.

✓ **Saveur** : les quarks se classent en six types, nommés saveurs. Les neutrons sont constitués de deux quarks *d* et d'un quark *u*.

✓ **Charge** : les quarks ont une charge électrique (+ 2/3 pour le quark *u* et - 1/3 pour le quark *d*), et confèrent leur charge globale au proton (+ 1) et au neutron (nulle).

✓ **Couleur** : chaque quark porte une « couleur », une propriété de l'interaction forte responsable de la cohésion du baryon. Les quarks ont trois couleurs possibles, les gluons huit, et tout assemblage de quarks ou gluons est « incolore ».

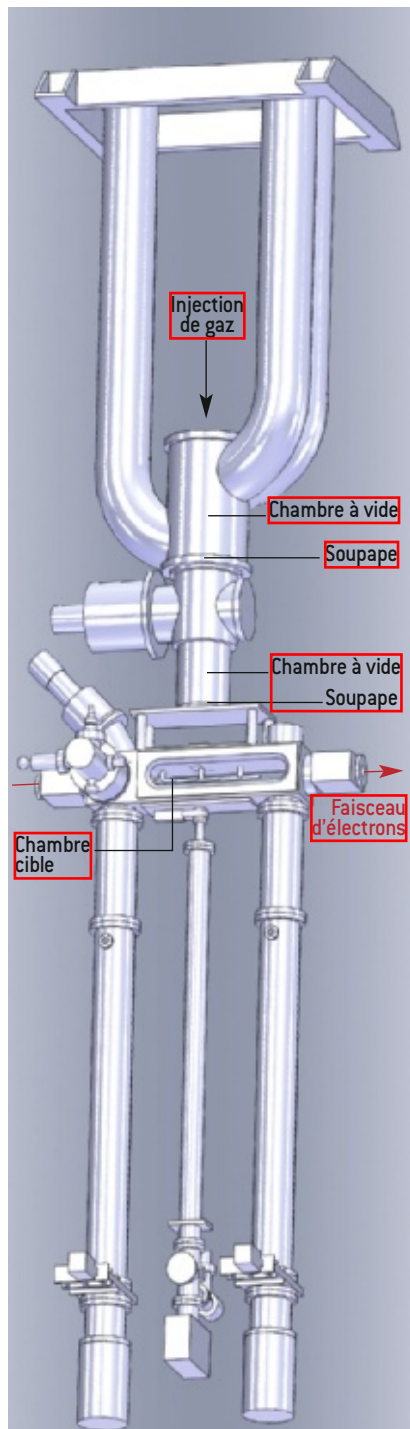
✓ **Spin** : les quarks sont des particules magnétiques, caractérisées par un spin. L'orientation relative des spins des quarks du neutron influe sur leurs orbites : deux spins parallèles se repoussent, comme deux aimants.

particules identiques, telles que des quarks ou des électrons, sont présentes au même endroit, leurs propriétés globales doivent être différentes, plus exactement antisymétriques. Examinons par exemple les deux quarks *d* du neutron. Dans le modèle CQM, leurs orbites sont symétriques (facteur associé: +1); chaque quark portant une couleur différente, leurs charges de couleur sont antisymétriques (-1). Ainsi, les spins portés par les quarks doivent être symétriques (+1), c'est-à-dire parallèles, afin que le total soit antisymétrique $[(+1) \times (-1) \times (+1) = -1]$. Donc dans ce modèle simplifié, l'interaction répulsive des spins parallèles déforme légèrement les orbites des quarks.

Pour le proton, cette déformation orbitale se traduit par une légère modification de la distribution de charge. Mais pour le neutron, l'effet est bien plus prononcé. Les quarks *d* se situent un peu plus loin du centre que le quark *u*: les charges portées par les quarks ne sont pas réparties de façon uniforme, et ne s'annulent pas exactement quelle que soit la distance du centre. Si ce modèle est correct, nous devrions nous attendre à ce que le neutron soit légèrement négatif en périphérie, et légèrement positif à proximité du centre. Cet écart par rapport à une densité de charge uniformément nulle est ce qui rend le neutron si singulier. Si l'on réussissait à mesurer une distribution de densité de charge non nulle, cela nous renseignerait sur l'équilibre entre les effets des spins et ceux de la chromodynamique quantique, une information difficile à obtenir pour le proton. C'est ce qui rend le neutron particulièrement intéressant.

Regard neuf sur le neutron

De nouvelles techniques récemment mises au point améliorent la sensibilité des appareils de mesure, notamment pour la densité de charge et le facteur de forme électrique. Toutefois, la principale difficulté reste l'inexistence de cible de neutrons isolés. Les physiciens utilisent des faisceaux de neutrons, mais ils contiennent peu de neutrons: la probabilité pour des électrons d'être diffusés est extrêmement faible. Par conséquent, on utilise plutôt des cibles de deutérium. Un électron diffuse sur un noyau de deutérium lorsqu'il a heurté soit un proton, soit un neutron. Si l'on savait lequel, on n'aurait pas à soustraire les sections efficaces. Notre méthode



3. LA SOURCE DU FAISCEAU ATOMIQUE

de BLAST, qui produit le flux d'atomes de deutérium faisant office de cible, mesure environ quatre mètres de haut. Le deutérium gazeux est injecté par le haut et traverse des chambres à vide, séparées par des soupapes télécommandées. Des champs magnétiques variables polarisent le gaz qui pénètre dans la chambre cible située en bas, où il entre en collision avec le flux d'électrons issus de l'accélérateur de particules.

consiste à détecter non seulement l'électron issu de l'accélérateur, puis diffusé, mais également le neutron éjecté lors de la collision: ainsi, nous ne serons pas confrontés aux mêmes incertitudes qu'Hofstadter.

Une autre technique consiste à repenser la séparation des facteurs de forme électrique et magnétique. Celle-ci s'effectue en comparant les sections efficaces mesurées à différents angles et énergies. Cependant, les détecteurs ont des sensibilités qui dépendent de l'énergie et de l'angle, de sorte que les mesures et les calculs doivent être très précis, car les différences de section efficace sont très faibles.

Nous avons utilisé le fait que les orientations des spins de l'électron et du neutron apparaissent explicitement dans l'expression de la section efficace. Quand leurs spins sont parallèles, leurs facteurs de forme magnétique s'ajoutent à la section efficace; ce n'est pas le cas quand les spins sont antiparallèles ou perpendiculaires. Il est très difficile de modifier l'orientation des spins, autrement dit la polarisation du faisceau d'électrons et de la cible de neutrons, mais cela permet, en effectuant deux mesures pour différentes orientations relatives des spins, d'extraire soit le facteur de forme électrique, soit le facteur de forme magnétique.

Je me contenterai de décrire ici l'expérience BLAST (*Bates Large Acceptance Spectrometer Toroid*, Spectromètre toroïdal à large acceptance de Bates), à laquelle j'ai collaboré pendant près de 20 ans. Installée au Centre de l'accélérateur linéaire Bates de l'Institut de technologie du Massachusetts, MIT, près de Boston, cette expérience a rassemblé plus de 50 scientifiques, étudiants et ingénieurs issus d'une dizaine d'institutions.

Le Centre Bates a deux atouts. Son accélérateur produit un faisceau d'électrons polarisé à 66 pour cent; cela signifie que 83 pour cent des spins des électrons ont la même orientation. De plus, l'accélérateur est associé à un anneau de stockage: les électrons sont accumulés dans une boucle de 180 mètres, parcourant cet anneau un grand nombre de fois jusqu'à heurter un deutéron de la cible – un faisceau de deutérium gazeux polarisé (voir la figure 3). Les spins des atomes de deutérium sont préalablement alignés grâce à une série d'aimants et de cavités radiofréquence. Ce processus permet de former une cible contenant 70 billions (70×10^{12}) d'atomes par centimètre cube – une densité généralement considérée comme un bon vide. Un élec-

Jim Kasper / MIT - Centre Bates

tron du faisceau, qui traverse la cible deux millions de fois par seconde, ne rencontre un deuteron qu'après une vingtaine de minutes. Il aura alors parcouru dans l'anneau de stockage une distance équivalente au diamètre de l'orbite de la Terre!

Seuls quelques milliers d'électrons diffusent donc sur la cible chaque seconde. Parce que nous voulons détecter les particules éjectées dans une large gamme d'angles et d'énergies, nous avons placé le détecteur tout autour de la cible. Les particules diffusées passent dans un champ magnétique intense qui permet de mesurer leur énergie: elles sont d'autant plus déviées que leur quantité de mouvement est faible.

Pour résumer, BLAST est un détecteur enroulé autour d'une cible polarisée de neutrons, placé dans un faisceau d'électrons fortement polarisé. Ce faisceau de 850 mégaélectronvolts a une intensité atteignant 200 microampères. Si l'énergie n'est pas très élevée, l'intensité est impressionnante, similaire à celle du LHC, le grand collisionneur de hadrons du CERN. Le dispositif a la structure d'un oignon, le détecteur étant constitué de nombreuses couches entourant la cible placée en son centre.

Quand un électron heurte un deuteron, il est diffusé, avec un proton ou un neutron et parfois un pion. La particule pénètre d'abord dans une chambre remplie de centaines de fils sensibles à une particule passant à proximité: on détecte ainsi sa position. La chambre à fils, contenant de nombreuses couches, est plongée dans un champ magnétique, de telle sorte que nous pouvons utiliser les signaux des fils de détection pour déterminer la trajectoire de la particule et sa quantité de mouvement.

Ensuite, la particule traverse plusieurs épaisseurs d'un scintillateur qui émet de la lumière en réponse au rayonnement ionisant de la particule et indique le temps d'arrivée de la particule avec une précision de 300 picosecondes (10^{-9} seconde). Dans environ dix pour cent des cas, les scintillateurs arrêtent également les neutrons: on peut alors évaluer leur énergie.

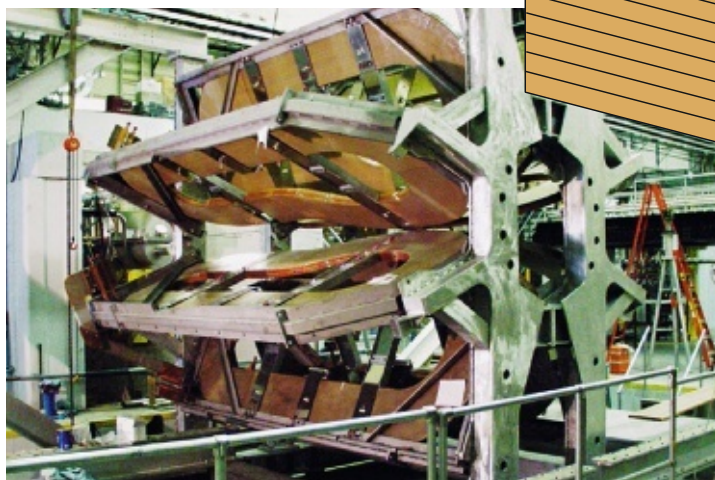
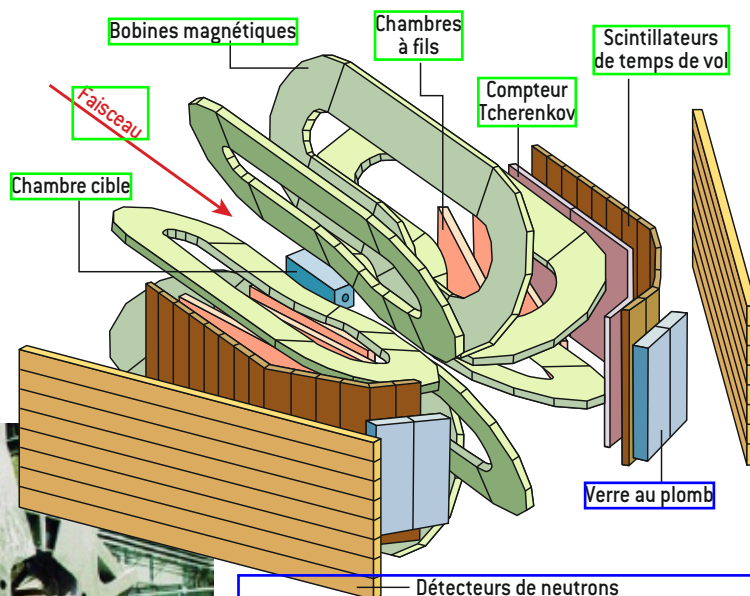
Le neutron n'est pas si neutre

Après quelques années de conception, la construction de BLAST a démarré en 1999. De 2003 à 2005, l'expérience a enregistré des données presque en continu. Les résultats de l'expérience sont parmi les meilleures mesures au monde, mais seulement dans une plage limitée de quantité de mouvement. Il a donc fallu compléter ces mesures avec celles d'autres laboratoires, en particulier de l'Université Johannes Gutenberg de Mayence, en Allemagne, et de l'accélérateur Thomas Jefferson en Virginie.

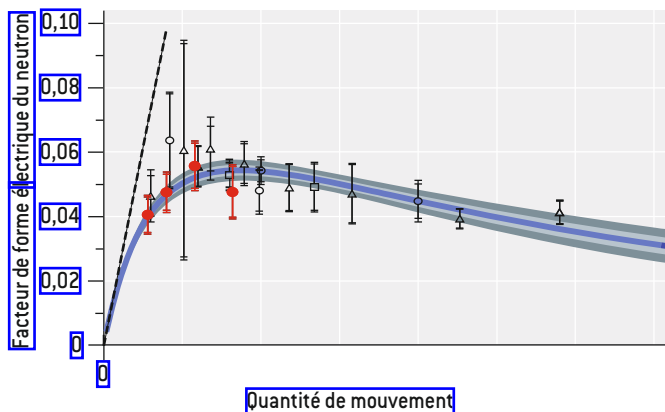
Qu'avons-nous appris de toutes ces expériences? Avant tout, que le facteur de forme électrique du neutron n'est pas nul. Ce facteur est relié à la probabilité que

le neutron puisse absorber une certaine fraction de la quantité de mouvement transmise par l'électron lors de l'impact tout en restant un simple neutron. En représentant le facteur de forme électrique en fonction de la quantité de mouvement de l'électron, on voit qu'un électron ayant une faible quantité de mouvement interagit avec la particule dans sa globalité: cette mesure à basse résolution indique un neutron de charge globale nulle. Quant à un électron beaucoup plus énergétique, il peut traverser le neutron et ainsi sonder des échelles beaucoup plus petites.

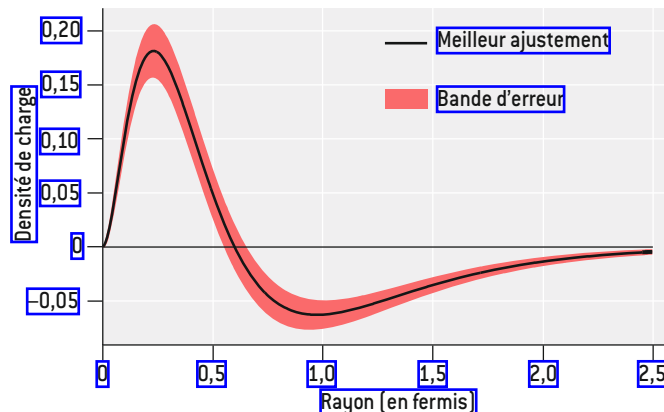
En physique, on interprète habituellement le facteur de forme comme la transformée de Fourier de la densité de charge électrique de la particule (la transformée de Fourier relie quantité de mouvement et position). On peut ainsi transformer la courbe donnant le facteur de forme pour obtenir la densité de charge du neutron: le cœur de la particule est positif et sa périphérie négative (voir la figure 5). Différents modèles ont été introduits il y a une dizaine d'années, tels le modèle du nuage de pions ou celui de répulsion des spins de quark. On confirme aujourd'hui que ces deux modèles semblent corrects. Pour les



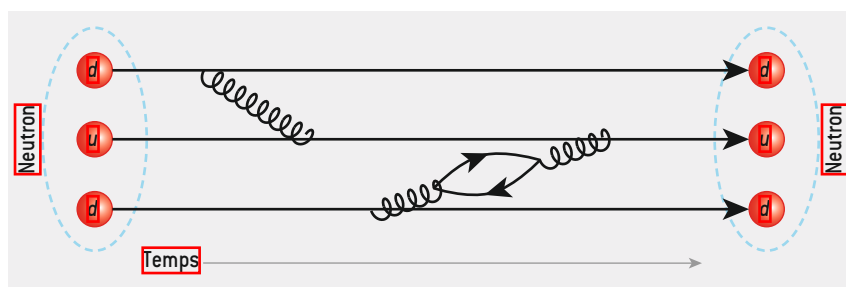
4. LE DÉTECTEUR DE L'EXPÉRIENCE BLAST est constitué de plusieurs couches de capteurs entourant la cible centrale. Les bobines magnétiques [ci-contre] permettent de déterminer la quantité de mouvement des particules éjectées, et les chambres à fils détectent la position et la trajectoire d'une particule. Les compteurs Tcherenkov distinguent les pions des électrons. Les scintillateurs de temps de vol, des couches de plastique émettant de la lumière en réponse à un rayonnement ionisant, déterminent avec précision le moment où la particule a traversé le détecteur. Les scintillateurs peuvent parfois arrêter les particules et enregistrer alors leur quantité d'énergie.



5. DIFFÉRENTES EXPÉRIENCES ont permis d'évaluer le facteur de forme électrique du neutron, une mesure de la probabilité qu'un électron accéléré soit diffusé par un neutron en raison de leur interaction électrique (à gauche). Quand l'électron a une quantité de mouvement faible, l'absence de charge du neutron fait disparaître la diffusion électrique. Quand la quantité de mouvement est élevée, l'électron traverse le neu-



tron sans être perturbé. Mais pour des quantités de mouvement intermédiaires, l'interaction a lieu. Elle indique que la périphérie du neutron porte une charge légèrement négative : quand les données concernant le facteur de forme électrique sont converties en mesures de position, on constate que le centre du neutron porte une charge positive et sa périphérie une charge négative (à droite).



6. UN NEUTRON CONTIENT TROIS QUARKS de valence (en rouge), deux quarks d et un quark u , décrits ici sur un diagramme chronologique. Un gluon (spirale) est créé par un quark d , puis absorbé par le quark u . Plus tard, l'autre quark $down$ émet un gluon qui se scinde en une paire quark-antiquark, laquelle se recombine en gluon qui est lui aussi absorbé.

L'AUTEUR



Timothy SMITH, physicien à l'Université de Dartmouth, aux États-Unis, a dirigé le développement logiciel du projet BLAST (Bates Large Acceptance Spectrometer Toroid, pour Spectromètre toroïdal à large acceptation de Bates), à l'Institut de technologie du Massachusetts.

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

concilier, il nous faut revenir à notre représentation du neutron et du pion en faisant intervenir les quarks.

Ainsi, le neutron est constitué de trois quarks de valence, ainsi que de gluons et de paires quark-antiquark éphémères. Jusqu'à présent, nous ne nous sommes intéressés qu'aux trois quarks de valence : il nous faut faire intervenir les autres. Observons comment les quarks uud d'un neutron évoluent au cours du temps (voir la figure 6). Au bout d'un certain temps, un quark d émet un gluon, qui est absorbé par un quark u . Plus tard, un autre gluon est émis ; il donne alors une paire quark-antiquark, qui se recombine en un autre gluon, absorbé à son tour par un des quarks de valence.

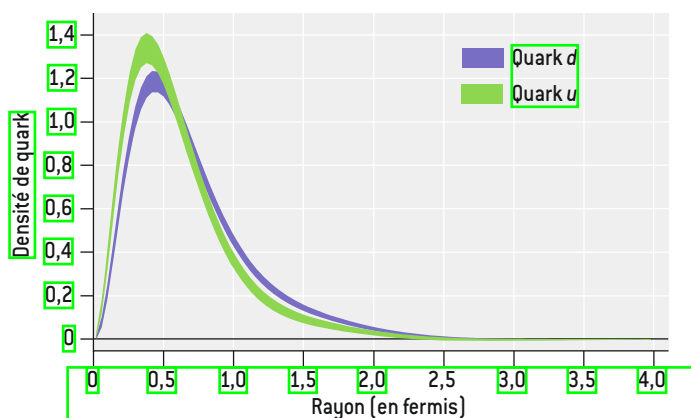
Les quarks et antiquarks éphémères constituent une mer de quarks. Ces quarks de la mer sont aussi réels que les quarks de valence : si un antiquark se combinait avec un quark de valence, le système serait en équilibre. Cette paire quark-antiquark pourrait former une nouvelle particule, tel

un pion, au moins pour un bref instant. Le pion formé serait alors réabsorbé dans le nuage de pions du neutron, où il pourrait être échangé avec un nucléon voisin, puis absorbé en tant que médiateur de l'interaction nucléaire forte. Ainsi, le nuage de pions est lié aux gluons et à la mer de quarks, et nous renseigne sur leur activité.

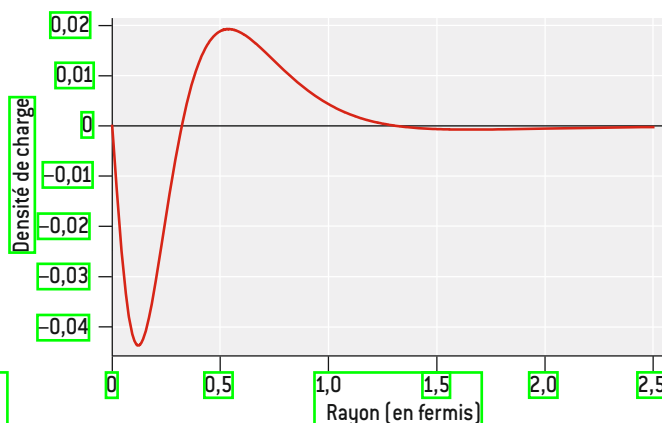
Si la façon la plus simple d'associer un quark et un antiquark est de former un pion, ce n'est pas la seule. Lorsque les spins de la paire quark-antiquark sont alignés, ils forment une particule plus massive, un méson ρ ou un méson ω , ou peut-être un méson plus exotique, tel le méson ϕ . Ainsi, il serait plus correct de parler d'un nuage de mésons, au lieu d'un nuage de pions, entourant le neutron.

Un cœur très relatif

Que se passe-t-il à l'intérieur du nuage, à une distance inférieure à un fermi, ce qui est normalement considéré comme la frontière d'un nucléon ? Le quark u semble plus près du centre, avec un rayon d'environ 0,35 fermi, et les quarks d en sont plus éloignés, à environ 0,5 fermi. On aboutit alors, par la transformée de Fourier du facteur de forme électrique, à une description du neutron considérée par certains physiciens comme notre meilleure représentation actuelle : un nuage de mésons, une surface de quarks d et un cœur de quark u . Mais ce « portrait », pour instructif et attrayant qu'il soit, n'en présente pas moins quelques difficultés. Ce que nous voulions vraiment savoir, c'est à quoi ressemble un



7. AU SEIN MÊME DU NEUTRON, les données indiquent que le quark u est près du centre, alors que les quarks d se situent davantage vers l'extérieur (à gauche). Mais cette représentation ne montre pas le neutron au repos, avant qu'il n'ait été sondé par le faisceau. Une procédure différente consiste à étudier le neutron dans un référentiel dans lequel il se déplacerait à une vitesse proche de celle de la lumière. Cependant, cette procé-



dure modifie le « centre » du neutron, qui est alors défini comme la zone de plus grande quantité de mouvement, et non plus comme le centre de masse. Dans ce référentiel nommé IMF, le neutron semble doté d'un cœur négatif plutôt que positif (à droite). Cette réponse est correcte, mais elle ne correspond pas à la question que les physiciens se posaient au départ : quelle est la structure du neutron au repos ?

neutron « normal », au repos. Or la transformée de Fourier est à mi-chemin entre le neutron de départ, au repos, et le neutron d'arrivée, après la collision. C'est un peu comme prendre une photo au flash, et s'apercevoir ensuite que les personnes ont les yeux rouges, ou ont sursauté à cause du flash. Nous aimerions penser que notre image est celle d'un neutron au naturel, mais c'est en fait celle d'un neutron subissant une exploration invasive, qui le perturbe.

Ces dernières années, les physiciens ont donc mis au point une procédure différente. Elle consiste à examiner le neutron dans un référentiel de moment infini (IMF pour *Infinite Momentum Frame*), ce qui équivaut à étudier le neutron comme s'il se propageait pratiquement à la vitesse de la lumière. Cette procédure est compatible avec la théorie de la relativité, elle est mathématiquement correcte, mais elle ne permet pas vraiment de répondre à notre question : à quoi ressemble un neutron au repos ? Le facteur de forme électrique comme le facteur de forme magnétique interviennent dans cette procédure, car ils se mélangent à ces vitesses. Étant donné que le facteur de forme magnétique est négatif, la distribution de charge résultante est modifiée (voir la figure 7). Dans ces conditions, le cœur du neutron est chargé négativement, un résultat qui gêne de nombreux physiciens.

En première analyse, on définit le cœur du neutron comme le centre de masse des trois quarks de valence. Ils sont tous en orbite autour d'un même point, situé quelque part au milieu du triangle qu'ils forment. Dans le référentiel IMF, le neutron a un mouve-

ment relativiste, à la vitesse de la lumière, si bien qu'il s'aplatit dans la direction du mouvement. Dans cette situation, la masse joue un rôle beaucoup moins important que la quantité de mouvement ; le centre, correspondant alors à la plus grande quantité de mouvement, est imposé par les quarks d . Puisque les quarks d sont négatifs, le centre est également négatif. Le modèle IMF est cohérent et correct, mais il répond à une question encore un peu différente. Le « centre », tel qu'il apparaît dans ce modèle, n'est pas le centre d'un neutron immobile, tel que nous voulions l'observer ; cela explique pourquoi les deux modèles donnent des résultats contradictoires.

Une vision encore floue

À quoi ressemble un neutron ? Ce n'est pas un minuscule caillou inerte, il est dynamique, constamment en train d'éjecter et d'absorber des mésons de toutes sortes. Sa surface est dominée par des quarks d négatifs. L'intérieur abrite un quark u positif. Son cœur, soumis à d'intenses effets relativistes, serait dominé par les quarks d .

Quelle sera la suite du programme ? Il reste beaucoup à apprendre sur la structure du neutron et la façon dont ses constituants lui confèrent son spin. Le neutron, en perpétuel renouvellement, crée et absorbe sans cesse des mésons. En précisant la nature et le comportement de ces particules, peut-être finirons-nous par retrouver le modèle élaboré par Heisenberg et Fermi dans les années 1940... ■

✓ BIBLIOGRAPHIE

C. Crawford *et al.*, The role of mesons in the electromagnetic form factors of the nucleon, *Physical Review C*, vol. 82, n° 4, 045211, 2010.

D. Hassel *et al.*, The BLAST experiment, *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A*, vol. 603, n° 3, pp. 247-262, 2009.

I. P. Smith, *Hidden Worlds: Hunting for Quarks in Ordinary Matter*, Princeton University Press, 2002.

R. Kranner, La vie intérieure du proton, *Pour la Science*, n° 284, juin 2001.

R. Hofstadter *et al.*, Electromagnetic structure of the proton and neutron, *Review of Modern Physics*, vol. 30, pp. 482-497, 1958.

J. Chadwick, The existence of a neutron, *Proceedings of the Royal Society A*, vol. 136, pp. 692-708, 1932.

Les surprises de l'évolution humaine

Jonathan Pritchard

De nouvelles analyses génétiques suggèrent que l'évolution récente de l'homme a suivi un cours plus lent que celui prévu par les biologistes.

Il y a quelques milliers d'années, des hommes venant de Chine ont accédé pour la première fois au Plateau tibétain, vaste étendue de steppes qui culmine à quelque 4 200 mètres au-dessus du niveau de la mer, au Nord de l'Himalaya. Ces pionniers ont colonisé cet écosystème nouveau pour eux, mais ils n'étaient pas adaptés à la faible concentration d'oxygène régnant à cette altitude, qui devait entraîner un mal des montagnes chronique et une forte mortalité infantile.

En 2010, plusieurs études génétiques ont identifié des variants de gènes impliqués dans l'utilisation de l'oxygène. Ces variants, fréquents chez les Tibétains, mais rares dans les autres groupes humains, expliqueraient l'adaptation des pionniers aux rudes conditions du Plateau tibétain. C'est là un exemple spectaculaire d'une adaptation biologique rapide de l'homme à de nouvelles conditions environnementales, dans un passé récent. Une étude a estimé que l'un de ces variants s'est répandu chez près de 90 pour cent de la population tibétaine en moins de 3 000 ans

– un très bref instant à l'échelle des temps de l'évolution.

Le passage aux milieux d'altitude n'est qu'une des contraintes auxquelles notre espèce, *Homo sapiens*, a dû faire face quand elle a migré des chaudes savanes africaines vers les toundras glaciales, les forêts tropicales humides et les déserts brûlés par le soleil, il y a peut-être 60 000 ans (les estimations vont de 50 000 ans à 100 000 ans).

L'adaptation génétique

Bien sûr, une grande part de l'adaptation de l'homme à son milieu de vie a été technique, par exemple en luttant contre le froid par le feu et les vêtements. Mais les techniques n'ont pu suffire à l'adapter au manque d'oxygène en altitude, aux ravages des maladies infectieuses, au rayonnement ultraviolet et à d'autres contraintes de l'environnement. L'adaptation s'est aussi produite par le jeu de variations génétiques aléatoires qui ont ensuite été sélectionnées par l'environnement.

Il est donc raisonnable de s'attendre à ce que nos génomes révèlent des preuves de mutations génétiques que la sélection naturelle a répandues dans différentes populations : les individus porteurs des mutations protectrices ont, plus que les autres, des enfants en bonne santé qui deviennent à leur tour des adultes capables de se reproduire.

En 2004, mes collègues et moi avons entrepris de rechercher les empreintes des changements environnementaux dans le génome humain. Nous voulions comprendre comment les hommes ont évolué depuis que leurs ancêtres sont sortis d'Afrique. Dans quelle mesure les populations de diverses régions du monde diffèrent-elles génétiquement sous l'action de la sélection naturelle, due à différentes pressions environnementales ? En quelles proportions ces différences découlent-elles d'autres influences que la sélection naturelle ? Grâce aux progrès des techniques permettant d'étudier les variations ponctuelles des génomes, nous avons commencé à aborder ces questions.



L'ESSENTIEL

✓ Quand les premiers hommes ont quitté l'Afrique il y a environ 60 000 ans, ils ont dû relever des défis environnementaux qu'ils ne pouvaient pas affronter avec les seules techniques préhistoriques.

✓ On pensait donc que les études de nos génomes révéleraient des mutations adaptatives, qui se seraient répandues rapidement et largement dans diverses populations par le jeu de la sélection naturelle.

✓ Or, si le génome humain contient quelques exemples de sélection naturelle rapide, la plupart de ses changements semblent s'être produits à un rythme relativement lent.

Ces travaux sont encore en cours, mais les premiers résultats sont surprenants. Nos données suggèrent en effet que le scénario classique de la sélection naturelle, selon lequel une mutation avantageuse unique se répand rapidement dans une population donnée parce qu'elle est sélectionnée, a été peu fréquent au cours des 60 000 dernières années. Au lieu de cela, le changement évolutif semble exiger des pressions environnementales constantes durant des dizaines de milliers d'années. La plus grande partie des traces d'adaptation dans le génome s'y sont inscrites par le jeu de longs processus de sélection naturelle.

Aujourd'hui, il est certain que l'homme évolue toujours. Mais face aux problèmes auxquels l'être humain est confronté – le

changement climatique mondial et de nombreuses maladies infectieuses par exemple –, la sélection naturelle agirait trop lentement pour être d'un grand secours. Pour les résoudre, l'homme devra faire appel à la culture et à la technologie.

Il y a encore dix ans, les scientifiques ne pouvaient pas retracer les réactions génétiques de l'espèce humaine à l'environnement; les outils nécessaires n'existaient pas. La situation a changé avec l'achèvement du séquençage du génome humain, en 2001, et la production de bases de données publiques de variations génétiques, telle la base *HapMap*.

Le génome humain est constitué d'environ trois milliards de paires de nucléotides d'ADN, représentées chacune par

deux lettres parmi quatre possibles. Cette succession de nucléotides, qui comprend environ 20 000 gènes, sert de manuel d'instructions que la cellule décode pour synthétiser ses protéines. Ces quelque 20 000 gènes représentent environ deux pour cent du génome humain; une proportion similaire participe à la régulation

1. L'ÉTUDE DE VARIATIONS PONCTUELLES

dans l'ADN d'individus de différentes populations du monde, telles celles représentées ici, montre que nos ancêtres se sont adaptés génétiquement aux environnements changeants qu'ils rencontraient, notamment lors de leurs migrations. Les traces d'évolution les plus fréquentes s'y sont inscrites au cours de processus de sélection naturelle qui ont duré parfois des dizaines de milliers d'années.

des gènes *via* de courtes séquences généralement situées à proximité des gènes. Et la plus grande partie du génome n'a pas de rôle connu.

Dans l'ensemble, les génomes de deux individus sont similaires : ils ne diffèrent en moyenne que par une paire de nucléotides sur 10 000 environ. Les sites sur lesquels une paire de nucléotides se substitue à une autre sont désignés sous le terme de polymorphismes nucléotidiques simples (polymorphismes d'un nucléotide), abrégé SNP (*Single-Nucleotide Polymorphisms*). Les versions alternatives de cha-

tion. En théorie, un allèle utile peut être fixé en seulement quelques centaines d'années s'il confère un avantage très important, car la sélection naturelle le retient chez une plus grande proportion d'individus à chaque génération. Inversement, un allèle moins avantageux se répand en quelques dizaines de milliers d'années.

À l'aide d'échantillons d'ADN provenant d'ossements anciens, nous pourrions suivre les variations de fréquence des allèles au cours du temps. Mais en général, l'ADN se dégrade rapidement, et cette méthode reste d'utilisation limitée. C'est

tif (voir l'encadré page ci-contre). On comprend donc que les régions du génome peu variables dans une population soient les témoins d'un processus sélectif passé.

La propagation par sélection naturelle d'allèles avantageux, ou sélection positive, peut aussi laisser d'autres motifs distinctifs dans le génome : si un allèle se révèle soudain utile dans une population confrontée à de nouvelles conditions, cet allèle est sélectionné chez un grand nombre d'individus et peut atteindre rapidement une fréquence élevée, tout en restant rare dans les autres groupes, sans engendrer nécessairement un signal d'auto-stop, c'est-à-dire une augmentation de la fréquence de variations neutres. C'est ce qui s'est passé pour certains gènes des populations tibétaines.

LORSQU'UNE MUTATION AVANTAGEUSE se propage vite dans un groupe humain, elle emporte avec elle un tronçon du chromosome environnant, par « auto-stop génétique ».

que SNP sont des allèles. Comme la plus grande partie du génome ne code pas de protéines et ne régule pas de gènes, la plupart des SNP n'ont probablement pas d'effet mesurable sur l'individu.

En revanche, lorsqu'un SNP apparaît dans une région du génome qui code une protéine ou qui régule un gène, il peut modifier la structure ou la fonction de la protéine et sa quantité synthétisée. Les mutations à l'origine de SNP peuvent donc changer presque tous les caractères, que ce soient la taille, la couleur des yeux, la capacité de digérer le lait ou la sensibilité à des maladies, telles que le diabète, la schizophrénie et les maladies infectieuses.

Quand la sélection naturelle favorise les individus porteurs d'un allèle particulier, celui-ci devient plus fréquent dans la population à chaque nouvelle génération, tandis que l'allèle défavorisé se raréfie. Finalement, si l'environnement reste stable, l'allèle avantageux se répand dans 100 pour cent de la population, tandis que l'autre allèle disparaît.

Ce mécanisme de fixation exige de nombreuses générations. En effet, imaginons qu'une personne portant deux allèles bénéfiques (un sur chaque chromosome homologue) engendre en moyenne dix pour cent de plus d'enfants que celles qui n'ont pas l'allèle avantageux, et qu'un porteur d'une seule copie avantageuse engendre cinq pour cent de plus d'enfants. Il faut alors à l'allèle près de 200 générations, soit environ 5 000 ans, pour que sa fréquence passe de un pour cent à 99 pour cent de la popula-

tion. En théorie, un allèle utile peut être fixé en seulement quelques centaines d'années s'il confère un avantage très important, car la sélection naturelle le retient chez une plus grande proportion d'individus à chaque génération. Inversement, un allèle moins avantageux se répand en quelques dizaines de milliers d'années.

pourquoi beaucoup de généticiens, dont ceux de mon équipe à Chicago, ont choisi de rechercher des signes passés de la sélection naturelle dans le génome de différentes populations actuelles. Pour ce faire, ils ont passé au crible les variations génétiques d'un grand nombre de personnes d'une même population, afin d'y trouver les séquences d'ADN comprenant peu de SNP différents.

Des empreintes de sélection rapide

En effet, lorsqu'une mutation avantageuse se propage vite dans un groupe humain sous l'action de la sélection naturelle, elle emporte avec elle un tronçon du chromosome environnant la mutation, selon un mécanisme nommé auto-stop génétique. Cet effet d'entraînement génétique est dû aux échanges de segments d'ADN entre chromosomes, ou recombinaisons, qui se produisent pendant la formation des cellules sexuelles et lors de la fécondation.

Ainsi, lorsque l'allèle avantageux devient plus fréquent dans une population au fil du temps, les allèles voisins « neutres », qui n'affectent pas la structure ou la quantité de protéines de façon notable, mais qui accompagnent l'allèle sélectionné, le deviennent aussi dans ce même groupe. Résultat : la région du génome contenant l'allèle avantageux diffère moins d'un individu à un autre qu'une autre région. Cette diminution du nombre de variations des SNP dans cette région est nommée balayage sélec-

tion. En théorie, un allèle utile peut être fixé en seulement quelques centaines d'années s'il confère un avantage très important, car la sélection naturelle le retient chez une plus grande proportion d'individus à chaque génération. Inversement, un allèle moins avantageux se répand en quelques dizaines de milliers d'années.

De nombreuses études, dont celle que nous avons publiée en 2006, ont identifié plusieurs centaines de signaux de sélection naturelle qui se sont fixés dans le génome ces 60 000 dernières années, c'est-à-dire quasiment depuis qu'*Homo sapiens* a quitté l'Afrique. Dans quelques cas, les scientifiques ont déterminé quelles pressions sélectives se sont exercées et, donc, quel était l'avantage adaptatif de l'allèle sélectionné.

Par exemple, dans la plupart des populations humaines, les bébés digèrent bien le lactose, le sucre du lait, grâce à une enzyme, la lactase. Mais chez les mammifères, le gène codant la lactase ne s'exprime en général plus après le sevrage, si bien que la plupart des individus ne peuvent plus digérer le lactose une fois adultes. Cependant, des variants du gène de la lactase lui permettant d'être active à l'âge adulte sont apparus par hasard chez certains individus. Dans les populations élevant des vaches laitières, en Europe, au Moyen-Orient et en Afrique de l'Est, la pression de sélection exercée par la consommation de lait a alors favorisé ces variants.

D'après l'équipe de Joel Hirschhorn, de l'Institut de technologie du Massachusetts aux États-Unis, ces variants ont atteint une fréquence d'environ 80 pour cent chez les Européens élevant des vaches laitières en seulement 5 000 à 10 000 ans, puisqu'ils fournissaient un avantage sélectif. De même, Sarah Tishkoff et ses collègues de l'Université du Maryland ont mis en évidence, chez des éleveurs de vaches laitières en Afrique de l'Est, trois SNP associés à la persistance de la lactase chez l'adulte, témoins d'un balayage sélectif opéré depuis 7 000 ans.

On a aussi découvert des signaux de sélection positive dans une demi-douzaine de gènes impliqués dans la détermination de la couleur de la peau, des cheveux et des yeux chez les populations non africaines. Quand les hommes ont quitté leurs habitats tropicaux, ils ont été moins exposés au rayonnement ultraviolet du Soleil. Or le corps humain a besoin de ce rayonnement pour synthétiser la vitamine D, nutriment nécessaire à l'absorption du calcium. Sous les tropiques, le rayonnement ultraviolet est assez intense pour pénétrer une peau très pigmentée et activer la synthèse de cette vitamine. Ce n'est pas le cas sous les climats tempérés. Là, le besoin de quantités suffisantes de vitamine D aurait sélectionné les individus à couleur de peau plus claire (voir la figure 2).

Des signaux de sélection sont aussi visibles dans divers gènes conférant une résistance à des maladies infectieuses. Par exemple, Pardis Sabeti et ses collègues de l'Université Harvard ont découvert en 2007 une mutation dans le gène *LARGE*, qui s'est récemment répandue à une fréquence élevée chez les Yorubas du Nigeria. Cette variation serait une adaptation à l'émergence récente de la fièvre de Lassa dans cette région.

Une évolution plus lente que prévu

Ces exemples et d'autres illustrent une sélection naturelle positive agissant rapidement. Mais pour la plupart des signaux de sélection, nous ignorons quelles cir-

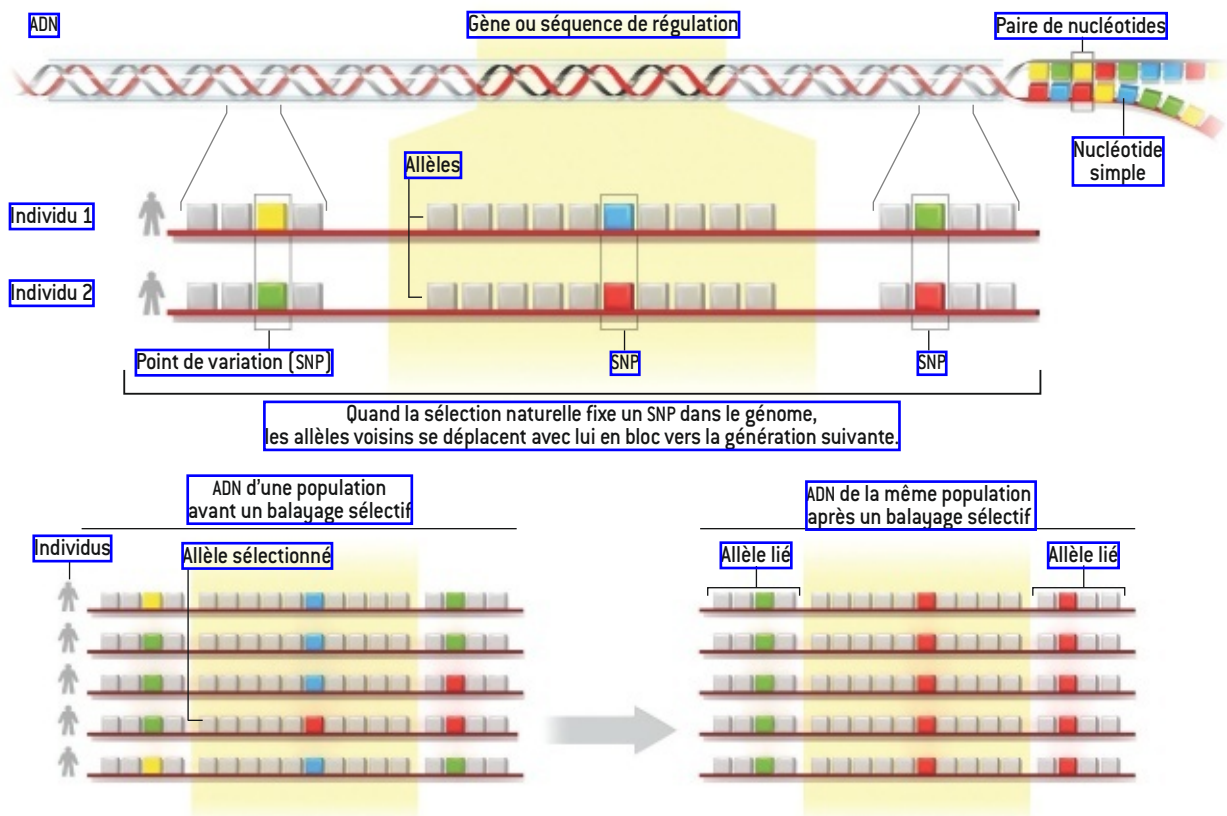
constances ont fait se propager l'allèle sélectionné, et quel effet exerce cet allèle. Jusque récemment, nous pensions que ces signaux candidats étaient les témoins de balayages sélectifs qui se seraient produits très rapidement ces 15 000 dernières années dans plusieurs populations humaines. Mais nous avons découvert que la plupart de ces signaux ne résultent pas d'une adaptation récente et rapide à l'environnement local.

Avec des chercheurs de l'Université Stanford, nous avons étudié un énorme ensemble de données SNP issues de quelque 1 000 individus de différents pays. En examinant les répartitions géographiques des allèles sélectionnés, nous avons découvert que les signaux, c'est-à-dire les balayages sélectifs, les plus prononcés

DES SIGNAUX DE SÉLECTION

Les scientifiques peuvent savoir que la sélection naturelle a agi sur une région de l'ADN s'ils observent peu de variations dans cette région d'un individu à l'autre. Voyons pourquoi. Les génomes de deux individus quelconques ne diffèrent que par une paire de nucléotides de l'ADN sur 1 000. Ces points de différence sont nommés polymorphismes nucléotidiques simples (SNP). Les versions alternatives de chaque SNP sont des allèles. Quand un allèle améliore le succès reproductif d'un individu, il se répand dans la population : on dit qu'il fait l'objet d'une sélection

positive puisque les individus qui en sont porteurs se reproduisent davantage que les autres. En même temps, comme la portion de chromosome qui le contient est échangée entre chromosomes d'une même paire, lors de la formation des cellules sexuelles et à la fécondation, les allèles voisins voyagent en compagnie de l'allèle sélectionné et deviennent également plus fréquents dans cette population. Il en résulte une diminution de la variation dans cette partie du génome au sein de la population, un phénomène nommé balayage sélectif.



DES DÉCOUVERTES SURPRENANTES ISSUES DES ÉTUDES DE POPULATION

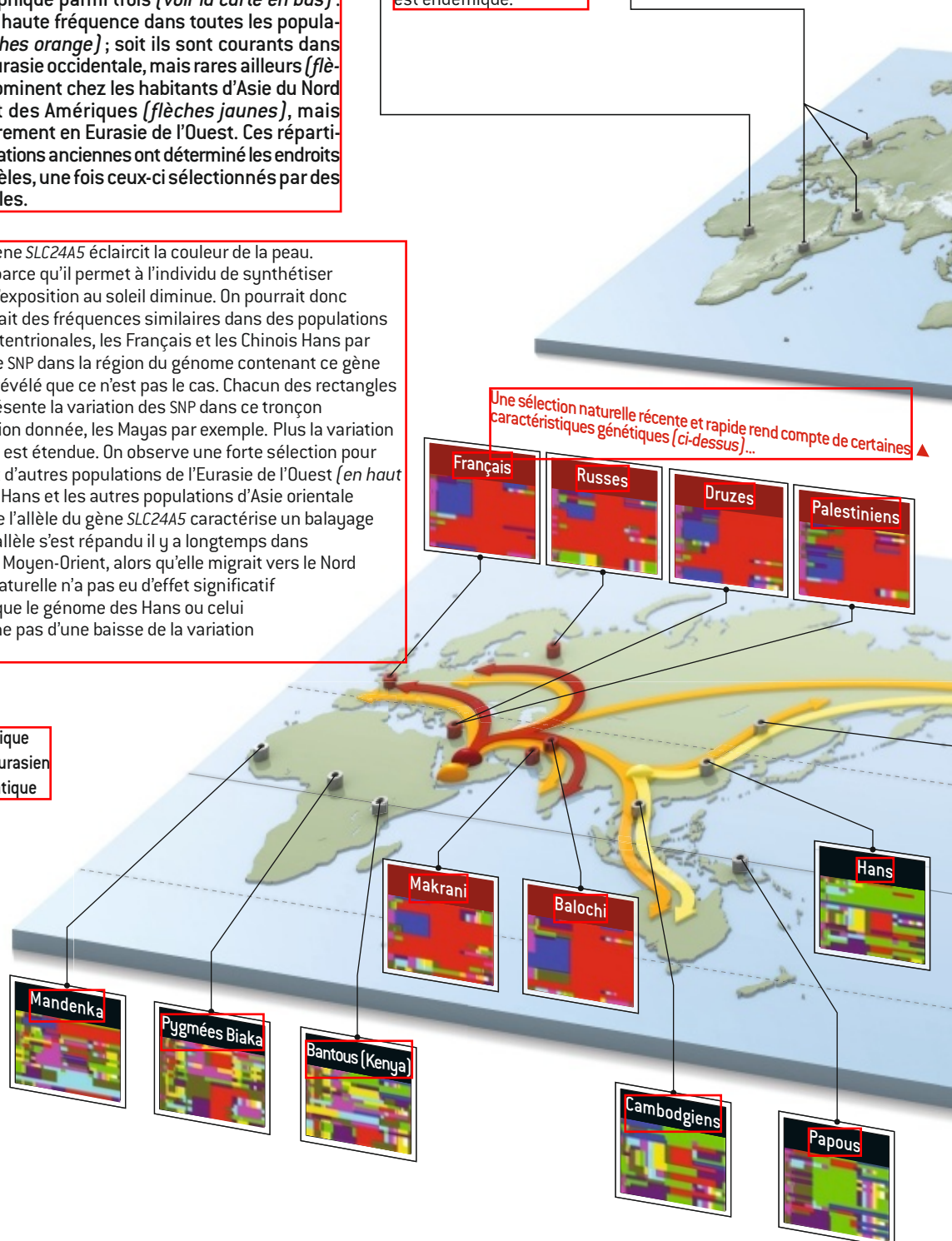
Les chercheurs ont identifié quelques variations génétiques avantageuses qui se sont répandues à une fréquence élevée parce qu'elles ont été sélectionnées rapidement par des pressions environnementales locales s'exerçant sur des individus (*voir la carte en haut*). Cependant, une analyse récente de plusieurs centaines de signaux génétiques apparents de la sélection naturelle, tels les balayages sélectifs, suggère que la plupart des variations génétiques ne représentent pas des adaptations récentes. La plupart des allèles sélectionnés détectés ont une répartition géographique parmi trois (*voir la carte en bas*) : soit ils se sont répandus à haute fréquence dans toutes les populations, sauf en Afrique (*flèches orange*) ; soit ils sont courants dans les populations de toute l'Eurasie occidentale, mais rares ailleurs (*flèches rouges*) ; soit ils prédominent chez les habitants d'Asie du Nord et de l'Est, de l'Océanie et des Amériques (*flèches jaunes*), mais n'apparaissent que très rarement en Eurasie de l'Ouest. Ces répartitions suggèrent que les migrations anciennes ont déterminé les endroits où se sont répandus ces allèles, une fois ceux-ci sélectionnés par des pressions environnementales.

Le gène *LARGE* participe à la réaction du corps contre la fièvre de Lassa. Il a subi récemment une forte sélection naturelle dans une population du Nigeria, où le virus de cette maladie est endémique.

Le gène de la lactase, l'enzyme qui dégrade le sucre du lait, a été rapidement sélectionné parmi les populations élevant des vaches laitières en Europe, au Moyen-Orient et en Afrique de l'Est ces 5 000 à 10 000 dernières années.

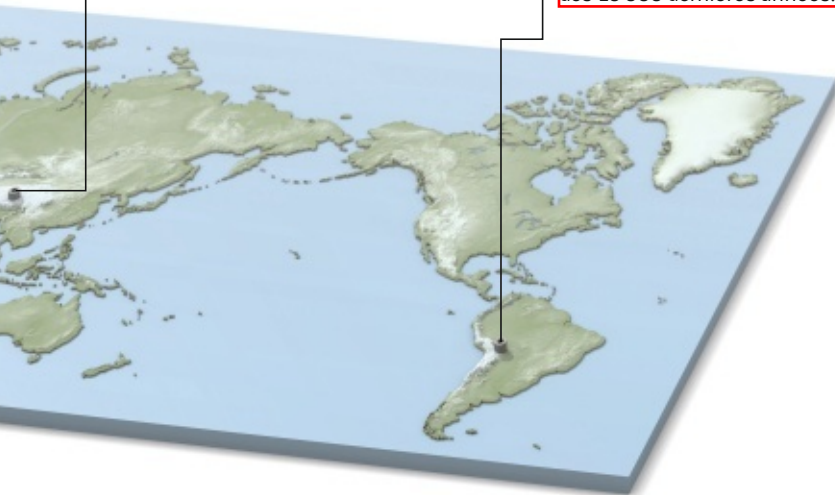
Un exemple : un variant du gène *SLC24A5* éclaire la couleur de la peau. Ce variant a été sélectionné parce qu'il permet à l'individu de synthétiser assez de vitamine D lorsque l'exposition au soleil diminue. On pourrait donc s'attendre à ce que cet allèle ait des fréquences similaires dans des populations vivant sous des latitudes septentrionales, les Français et les Chinois Hans par exemple. Mais la recherche de SNP dans la région du génome contenant ce gène dans diverses populations a révélé que ce n'est pas le cas. Chacun des rectangles multicolores (*ci-contre*) représente la variation des SNP dans ce tronçon du génome dans une population donnée, les Mayas par exemple. Plus la variation est faible, plus la partie rouge est étendue. On observe une forte sélection pour cet allèle chez les Français et d'autres populations de l'Eurasie de l'Ouest (*en haut à gauche*), mais pas chez les Hans et les autres populations d'Asie orientale (*à droite*). Cette répartition de l'allèle du gène *SLC24A5* caractérise un balayage spécifique ouest-eurasien : l'allèle s'est répandu il y a longtemps dans une population ancestrale au Moyen-Orient, alors qu'elle migrerait vers le Nord et vers l'Ouest. La sélection naturelle n'a pas eu d'effet significatif sur ce gène depuis lors, puisque le génome des Hans ou celui des Cambodgiens ne témoigne pas d'une baisse de la variation dans la région de ce SNP.

- Balayage sélectif hors Afrique
- Balayage sélectif ouest-eurasien
- Balayage sélectif est-asiatique

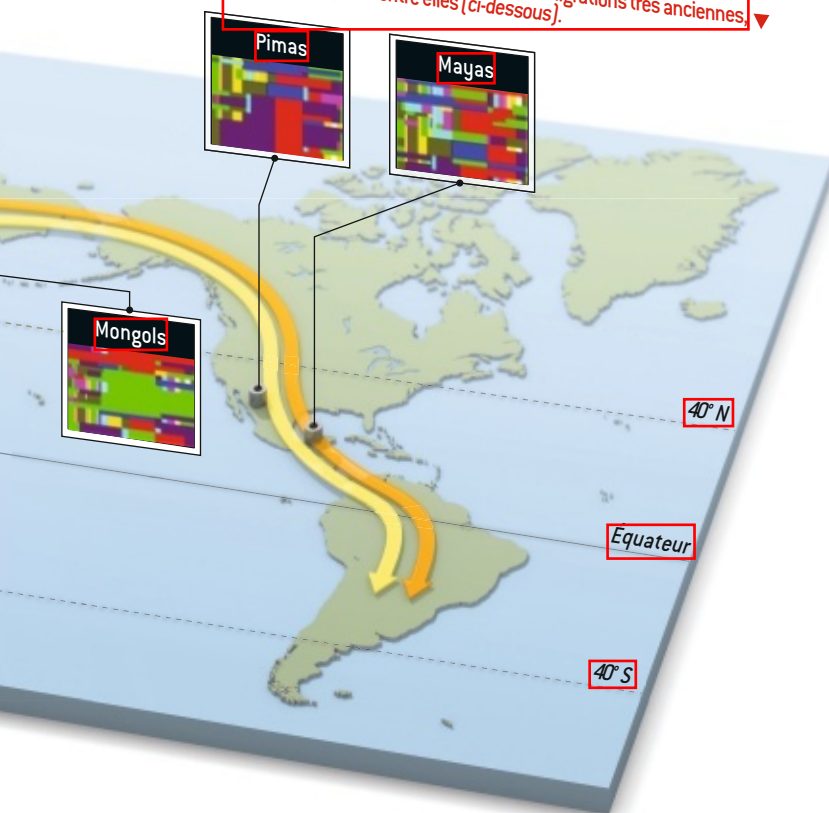


Un variant rare du gène du facteur 2-alpha inductible par l'hypoxie (HIF-2) s'est répandu avec une fréquence élevée chez les Tibétains depuis 3 000 ans. Il a permis, en ajustant la production de globules rouges, d'atténuer les effets de la raréfaction de l'oxygène aux altitudes élevées, atteignant les 4 200 mètres.

Chez les femmes qui habitent dans l'Altiplano bolivien, qui culmine à environ 3 700 mètres au-dessus du niveau de la mer, l'artère utérine subit une croissance accélérée durant la grossesse, comparée à la croissance observée chez les femmes vivant à des altitudes moins élevées – une adaptation qui s'est mise en place au cours des 10 000 dernières années.



mais... une sélection lente, associée à des migrations très anciennes, explique la plupart d'entre elles (ci-dessous).



avaient tendance à entrer dans un seul «schéma géographique» parmi trois (voir l'encadré ci-contre).

Dans des balayages sélectifs dits «hors d'Afrique», l'allèle favorisé et des allèles auto-stoppeurs sont présents à une fréquence élevée dans toutes les populations non africaines. Cela suggère que cet allèle adaptatif a commencé à se répandre peu de temps après que les hommes ont quitté l'Afrique, mais pendant qu'ils étaient confinés au Moyen-Orient – donc il y a peut-être environ 60 000 ans – et qu'il a été par la suite disséminé tout autour du globe, quand les hommes ont migré vers les régions septentrionales et orientales.

Deux autres configurations géographiques sont plus restreintes : dans l'une, un allèle favorisé apparaît avec une fréquence élevée dans toutes les populations de l'Europe, du Moyen-Orient et de l'Asie centrale et du Sud, mais pas ailleurs ; dans l'autre, l'allèle favorisé est le plus courant chez les Asiatiques de l'Est, ainsi que chez les Indiens d'Amérique, les Mélanésiens et les Papous. Ces répartitions caractérisent probablement des allèles qui ont commencé à se répandre après que les Eurasiens de l'Ouest et les Asiatiques de l'Est ont pris des routes différentes. On ignore quand cela s'est produit, sans doute il y a 20 000 à 30 000 ans.

Un allèle dispersé par les migrations

Ces différents balayages sélectifs révèlent que les anciens mouvements de population ont fortement influé sur les répartitions des allèles favorisés à travers le globe. La sélection naturelle a ensuite peu joué pour ajuster ces répartitions aux pressions environnementales modernes.

Par exemple, l'un des acteurs les plus importants de la pigmentation est le gène *SLC24A5*, identifié en 2005 chez le poisson zèbre. Un variant de ce gène constitue une adaptation à une faible exposition aux ultraviolets. On pourrait donc s'attendre à ce que sa fréquence augmente avec la latitude et soit similaire chez les individus vivant en Asie du Nord et en Europe du Nord. En réalité, nous observons une variation propre à l'Eurasie occidentale : le variant du gène et l'ADN «auto-stoppeur» qui se propage avec lui sont fréquents du Pakistan jusqu'à la France, mais pour l'essentiel absents en Asie de l'Est, y compris sous les latitudes septentrionales.

S. COOPER, IN : THE ROLE OF NEOPATHY IN HUMAN REPRODUCTION, PLUS GENETICS, VOL. 5, JUIN 2009

L'AUTEUR



Jonathan PRITCHARD est professeur de génétique humaine à l'Université de Chicago et chercheur à l'Institut médical Howard Hughes, aux États-Unis.

Cette répartition indique que le variant «peau claire» du gène *SLC24A5* est apparu dans la population ancestrale des Eurasiens occidentaux après qu'ils se sont séparés des ancêtres des Est-Asiatiques. Les Eurasiens l'ont ensuite disséminé dans leur région. Ainsi, la sélection naturelle a augmenté la fréquence de l'allèle du gène *SLC24A5*, mais c'est l'histoire de la population qui a déterminé quelles populations ont ou non cet allèle aujourd'hui.

Une autre configuration curieuse a été remarquée. La plupart des allèles dont la fréquence diffère beaucoup d'une population à l'autre – par exemple, ceux qui apparaissent chez presque tous les Asiatiques, mais pas chez les Africains – ne sont pas associés à des variations neutres, les signaux d'auto-stop que l'on s'attendrait à observer si la sélection naturelle avait rapidement augmenté la fréquence de ces allèles. Cela signifie que ces derniers se sont pro-

pagés peu à peu au cours des 60 000 ans qui ont suivi le départ d'Afrique.

À la lumière de ces observations, nous pensons que les balayages sélectifs classiques, dans lesquels la sélection naturelle entraîne rapidement la fixation d'une nouvelle mutation avantageuse, sont apparus assez rarement depuis le début de la dispersion d'*Homo sapiens* à travers le monde. En général, la sélection agit peu sur les allèles individuels, elle les favorise lentement. En conséquence, la plupart des allèles subissant une pression de sélection n'atteignent une fréquence élevée que si cette pression persiste des dizaines de milliers d'années.

Nos conclusions peuvent sembler paradoxales : s'il faut 50 000 ans, et non pas 5 000, pour qu'un allèle avantageux se répande dans une population, comment les hommes ont-ils réussi à s'adapter à de nouvelles conditions environnementales ?

Évolution humaine et maladies infectieuses

L'exposition des populations humaines aux différents pathogènes, donc aux maladies infectieuses, a été un facteur de sélection majeur dans l'évolution de l'homme. La réponse de l'organisme à une infection résulte de plusieurs facteurs. Ces derniers incluent la souche de l'agent infectieux, mais aussi l'histoire infectieuse de l'hôte, son patrimoine génétique et, probablement, sa population d'origine, qui a dû s'adapter au fil de diverses épidémies meurtrières.

La plupart des caractères dépendent de plusieurs gènes. Mais les adaptations génétiques les mieux comprises restent celles où n'intervient qu'un seul gène. De nombreuses études ont ainsi mis en évidence l'action de la sélection sur des gènes humains impliqués dans l'immunité ou dans les relations hôte-pathogène (par exemple les gènes *G6PD*, *CCR5*, *Duffy*, etc.). L'un des exemples les plus connus porte sur la mutation qui conduit à une forme anormale, notée HbS, de l'hémoglobine.

L'état homozygote (où les deux allèles du gène sont identiques et portent la mutation) de

HbS est associé à la drépanocytose, ou anémie falciforme, une maladie grave. Les individus porteurs de la mutation HbS dans l'état hétérozygote (où un seul allèle est muté) n'en sont pas atteints et sont résistants au paludisme dû au parasite *Plasmodium falciparum*. Ainsi, malgré ses effets néfastes dans l'état homozygote, la mutation est fréquente en Afrique, car elle a conféré un avantage évolutif : une résistance au paludisme.

Des études plus récentes ont montré que la pression de sélection exercée par le paludisme a été si vigoureuse qu'elle a joué sur un autre gène à différentes reprises au cours de notre histoire. En effet, deux mutations différentes du gène *G6PD* protègent du paludisme ; la version africaine de la mutation protège contre le paludisme dû à *Plasmodium falciparum*, tandis que la version trouvée en Asie du Sud-Est protège contre la forme due à *Plasmodium vivax*. Les deux mutations ont été sélectionnées parallèlement dans différentes régions du monde, et les études génétiques indiquent que

cela a commencé avec les débuts de l'agriculture.

Cet exemple conforte une fois de plus l'hypothèse que la transition vers l'agriculture s'est accompagnée d'une exposition accrue aux maladies infectieuses et qu'elle a instauré de nouvelles relations hôte-pathogènes. En effet, la taille des populations humaines a augmenté avec l'agriculture, un facteur bénéfique pour la virulence et la propagation de certains microbes. Et les hommes, devenus sédentaires, ont commencé à cohabiter avec des animaux, ce qui a favorisé la propagation de pathogènes entre espèces. À l'ère où le séquençage du génome humain à l'échelle des populations humaines devient une réalité, il est possible d'identifier des gènes (seuls ou en combinaison) de la réaction immunitaire ayant été modifiés par la sélection naturelle. Cela devrait apporter de nouvelles connaissances sur les processus immunologiques dirigés contre les pathogènes.

Lluís Quintana-Murci

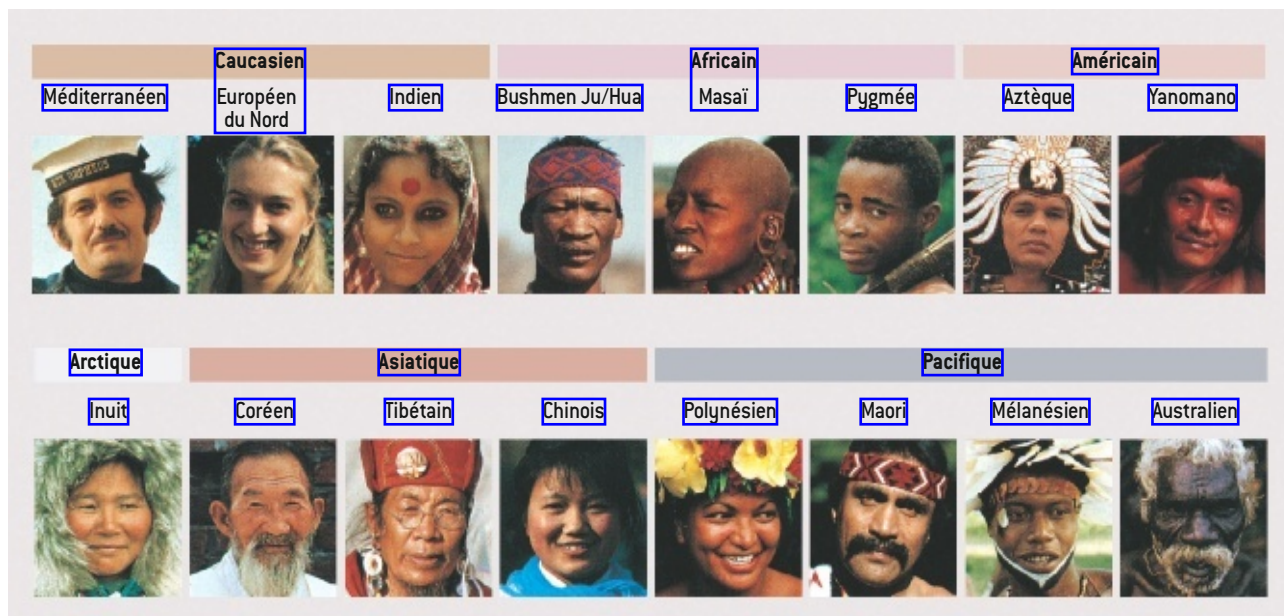
Directeur de recherche, Institut Pasteur-CNRS, Paris

Une pression répartie sur des dizaines de gènes

La réponse repose sur l'idée suivante : la plupart des caractères dépendent de plusieurs gènes et non d'un seul. Si les adaptations les mieux comprises résultent de changements dans un seul gène, la plupart sont sans doute polygéniques : elles proviennent de variants de centaines de gènes dont chacun a un effet modéré. On a ainsi identifié plus de 50 gènes ayant une influence sur la taille humaine, et il en reste beaucoup à découvrir. Chaque allèle fait augmenter la taille moyenne de trois à cinq millimètres seulement, comparé à l'autre forme possible du gène.

Chez les populations de Pygmées vivant dans la forêt humide en Afrique, dans le Sud-Est asiatique et en Amérique du Sud, une petite taille est une adaptation aux faibles ressources alimentaires disponibles. La sélection naturelle peut opérer en grande partie en modifiant un peu les fréquences alléliques de certains gènes parmi des centaines possibles. Si la version «taille petite» de chaque gène impliqué dans la taille devient plus fréquente de dix pour cent seulement, alors la plupart des individus de la population auraient rapidement plus d'allèles «taille petite», et la population dans son ensemble serait de plus petite taille.

Même si le caractère d'ensemble est soumis à une forte sélection, la pression de sélection



2. LES DIFFÉRENTES POPULATIONS HUMAINES se distinguent notamment par la couleur de la peau. La répartition des gènes conférant une peau claire résulte en partie d'une adaptation à la faible exposition aux rayons ultraviolets du soleil, dans les latitudes élevées.

tion sur chaque gène impliqué dans la taille est faible. Comme la sélection agissant sur tout gène individuel est faible, les adaptations polygéniques ne se présentent pas comme un signal classique de sélection dans les études du génome. Ainsi, il est possible que les génomes humains aient subi récemment plus de changements adaptatifs que ne peuvent en identifier les scientifiques en recherchant des signes de balayage sélectif.

L'homme évolue toujours

Il est difficile d'observer la sélection naturelle en train de modeler les populations actuelles. Cependant, les quelques variants de gènes qui procurent une certaine protection contre des maladies infectieuses y seraient soumis, car les individus qui en sont dotés ont plus de chances de survivre et d'avoir une descendance que ceux qui en sont dépourvus.

Ainsi, un variant génétique qui protège de la forme à *Plasmodium vivax* du paludisme est devenu omniprésent en Afrique subsaharienne. De même, des mutations atténuant l'infection par le VIH, le virus du sida, pourraient se répandre en quelques centaines d'années dans toute l'Afrique subsaharienne si ce virus devait persister. Toutefois, comme le VIH évolue plus vite que l'homme, nous en viendrons plus probablement à bout grâce à la technologie, par exemple sous la forme d'un vaccin.

Dans les pays industrialisés, les pressions de sélection les plus fortes agiraient sur les gènes qui modifient le nombre d'enfants auquel on peut donner naissance. En 2009, Stephen Stearns et ses collègues de l'Université Yale ont identifié six caractères morphologiques et physiologiques qui, chez les femmes, sont associés à un nombre d'enfants plus élevé. Les femmes sont légèrement plus petites et plus corpulentes que la moyenne et sont ménopausées plus tard.

En conséquence, si l'environnement reste stable, ces caractères devraient se répandre sous l'action de la sélection naturelle : l'âge moyen à la ménopause augmenterait alors d'environ un an dans les dix prochaines générations, soit 200 ans. Il est aussi plausible que les variations génétiques influençant le comportement sexuel, voire l'utilisation de contraceptifs, soient soumises à la sélection, bien que l'on ignore jusqu'à quel point les gènes changent de tels comportements complexes.

Cependant, les changements adaptatifs majeurs nécessitent des conditions stables pendant des millénaires, et évoluent bien plus lentement que la vitesse à laquelle nous modifions notre culture, notre technologie et notre environnement. Dans 5000 ans, le milieu de l'homme sera sans aucun doute différent. En revanche, en l'absence d'ingénierie génomique à grande échelle, les individus seront probablement, pour l'essentiel, toujours les mêmes. ■

✓ BIBLIOGRAPHIE

P. C. Sabeti *et al.*, Positive natural selection in the human lineage, *Science*, vol. 312, pp. 1614-1620, 2006.

S. A. Tishkoff *et al.*, Convergent adaptation of human lactase persistence in Africa and Europe, *Nature Genetics*, vol. 39, pp. 31-40, 2007.

G. Coop *et al.*, The role of geography in human adaptation, *PLoS Genetics*, vol. 5, e1000500, 2009.

X. Yi *et al.*, Sequencing of 50 human exomes reveals adaptation to high altitude, *Science*, vol. 329, pp. 75-78, 2010.

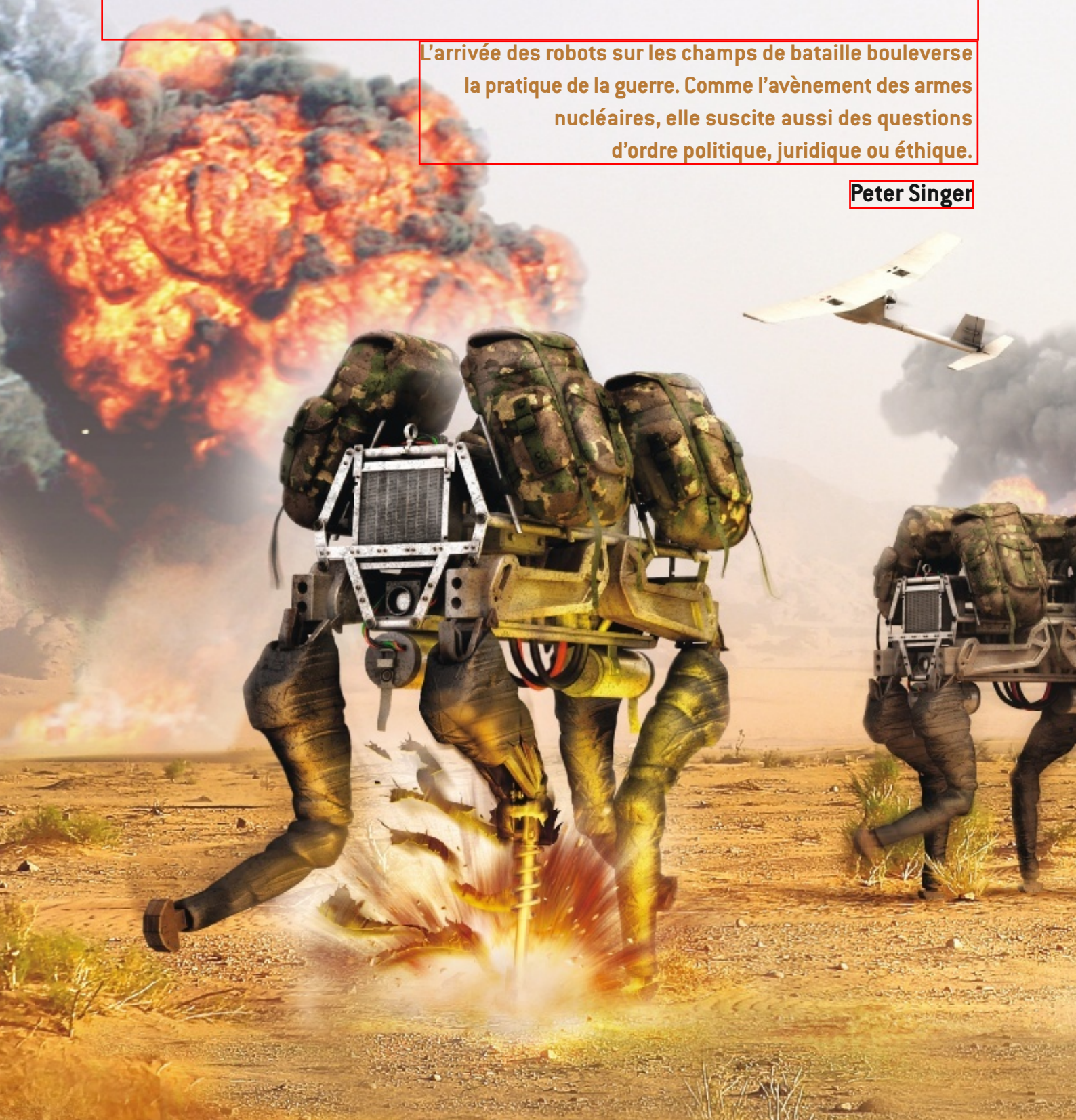
S. C. Stearns *et al.*, Measuring selection in contemporary human populations, *Nature Rev. Genet.*, vol. 11, pp. 611-622, 2010.

Robotique

La guerre des machines

L'arrivée des robots sur les champs de bataille bouleverse la pratique de la guerre. Comme l'avènement des armes nucléaires, elle suscite aussi des questions d'ordre politique, juridique ou éthique.

Peter Singer





L'histoire du robot militaire est liée à celle de l'AUVSI. L'Association internationale pour les systèmes de véhicules sans pilotes (en anglais *Association for Unmanned Vehicle Systems International* ou AUVSI) naît au début des années 1970 après l'utilisation des premiers drones de reconnaissance durant la guerre du Viêt-nam. Quelques ingénieurs, chercheurs et officiers américains la fondent alors pour convaincre le Pentagone et le public de l'intérêt d'employer sur un champ de bataille des machines autonomes.

Au début, l'AUVSI n'était qu'un obscur cercle de réflexion, qui se réunissait une ou deux fois par an pour discuter de questions techniques, créer des liens et échanger des on-dit. Toutefois, cette association a connu au cours des années 2000

une expansion fulgurante. Elle compte aujourd'hui 6 000 membres travaillant dans 1 500 entreprises et organismes répartis dans 55 pays.

Cette croissance est à mettre en parallèle avec l'un des changements les plus profonds dans les pratiques de la guerre depuis l'invention de la poudre ou des avions : l'essor de l'utilisation de robots, par les plus puissantes armées du monde, a été étonnamment rapide.

Quelques exemples illustreront ici les capacités militaires créées par l'arrivée des robots de première génération sur les champs de bataille. Nous mettrons ensuite en lumière les tendances qui se dessinent dans la génération suivante, avant d'évoquer les implications politiques et éthiques de la robotisation de la guerre.

L'ESSENTIEL

✓ Autrefois rejetés par le Pentagone, les robots militaires ont été introduits en nombre dans les guerres menées par les États-Unis au Proche-Orient depuis 2000.

✓ D'abord seulement aériens, les robots se sont multipliés au sol, sur les mers et dans les airs à mesure qu'augmentait leur diversité.

✓ Désormais admis, ils changent radicalement la conduite de la guerre, tout en soulevant les mêmes questions politiques et éthiques que les grandes innovations militaires antérieures.

LOZ ZH LUSHA, © GETTY IMAGES/MICHAEL A. PELTON/ODD

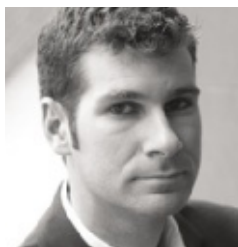


1. DANS LES GUERRES MODERNES, on voit de plus en plus de robots commandés à distance pour approvisionner les soldats au front, observer le champ de bataille ou procéder à des tirs.



2. CE DRONE PORTABLE, le *ScanEagle*, qui intègre une caméra de surveillance, est capable de survoler des zones isolées. Il a été couramment utilisé par les Marines américains dans la province iraquienne d'Al Anbar.

L'AUTEUR



Peter SINGER est spécialiste de questions militaires. Il dirige le groupe de réflexion *21st Century Defense Initiative* (Initiative pour la défense au XXI^e siècle) à la *Brookings Institution*, un centre de recherche en sciences sociales et politiques basé à Washington, aux États-Unis.

En 2003, alors que l'armée américaine progressait du Koweït vers Bagdad, pas un seul robot ne l'accompagnait. Elle emploie aujourd'hui 7 000 avions sans pilote et quelque 12 000 véhicules « automatisés ». Ces robots assurent des missions allant de la recherche de tireurs embusqués au bombardement de repaires d'al-Qaïda au Pakistan.

Ce sont les attentats du 11 septembre 2001 qui ont rendu prioritaire pour le Pentagone le développement de capacités à observer, repérer, puis frapper des cibles sans mettre en danger les militaires. Toute une série de nouvelles techniques, dont la géolocalisation par satellite (GPS), les progrès de la commande à distance et des interfaces homme-machine (jeux vidéo) ont rendu les robots utilisables et efficaces sur les champs de bataille.

Mais qu'entend-on par robot ? Très connoté par la science-fiction, le terme suggère une sorte de machine anthropoïde imitant le comportement des hommes. Un robot est en fait un système construit selon le principe « détecter-penser-agir ». Cela signifie que des capteurs embarqués nourrissent de données des processeurs où des intelligences artificielles (des programmes) prennent des décisions, qui sont ensuite traduites en instructions transmises à des actionneurs. Contrairement aux idées reçues, les robots sont de formes et tailles très diverses.

De fait, les jeunes Américains qui s'engagent aujourd'hui dans l'armée sont, dès leur incorporation, confrontés aux systèmes automatisés les plus divers. Pour apprendre à servir une arme (la manipuler correctement), ils utilisent par exemple des logiciels d'entraînement virtuel. Ils se familiariseront parfois avec le TALON, un petit robot conçu pour désamorcer des bombes ou observer le paysage par-delà une crête, à moins que leurs instructeurs ne les initient à l'usage du *PackBot*. Quand le prototype de ce petit robot démineur sur chenille, de la taille d'une tondeuse à gazon, fut testé sur le terrain au début de la campagne d'Afghanistan, en 2001, les soldats l'apprécièrent tellement qu'ils refusèrent de le rendre à la fin des essais... Depuis, *iRobot*, son constructeur, a vendu des milliers d'exemplaires du *PackBot*.

Si une jeune recrue intègre la marine, il pourra lui arriver de servir sur un contre-torpilleur de classe *Aegis* ou sur une frégate côtière de type LCS (de l'anglais *Littoral Combat Ship*). Ces deux types de bâti-

ment accueillent tout un ensemble de systèmes robotiques, depuis les hélicoptères sans pilote *Fire Scout* jusqu'à des bateaux à moteur sentinelles *Protector*.

Si une recrue fait carrière dans les sous-marins, elle pourra se retrouver au poste de pilotage d'un REMUS (*Remote Environmental Monitoring Unit System*) ; développé par l'Institut océanographique de Woods Hole, ce robot qui a une forme de torpille détecte les mines et surveille les côtes hostiles.

Engagée dans l'armée de l'air, une recrue en viendra peut-être à piloter au-dessus de l'Asie centrale des drones *Predator* ou *Global Hawk*, ce qu'elle pourra faire sans quitter les États-Unis...

Trois tendances pour la guerre robotisée

Les recruteurs de l'armée américaine présentent souvent ces nouveaux moyens techniques comme la réalisation d'idées de science-fiction. Il ne s'agit pourtant que des robots-soldats de première génération, c'est-à-dire d'un avant-goût de ce qui adviendra. Trois tendances nouvelles de la guerre robotisée se dégagent de l'examen des systèmes qui se préparent dans les entreprises et les laboratoires.

La première est que la guerre se livrera désormais à plusieurs échelles. En effet, dès lors qu'il n'y a plus de pilote à bord de machines, on peut leur donner des formes et des tailles très diverses. Tout se passe en fait comme aux débuts de l'industrie automobile, quand l'idée que les automobiles n'étaient que des charrettes sans chevaux a progressivement disparu à mesure que les constructeurs multipliaient les formes et les systèmes. De même, l'idée que les robots ne seraient que des machines comme les autres, à ce détail près qu'elles sont sans pilote, s'efface devant la variété de leurs configurations.

Comme on pouvait s'y attendre, certains des nouveaux robots imitent les animaux. Le *BigDog* de la Société *Boston Dynamics*, par exemple, est une sorte de mule mécanique conçue pour porter du matériel. D'autres robots sont aussi biomimétiques, mais de formes hybrides, tel le robot de surveillance doté de pattes et d'ailes inventé à la *Naval Postgraduate School*. En cours de développement, le *ChemBot*, créé par l'Université de Chicago et par la Société *iRobot*, est pour sa part conçu pour changer de forme afin de pouvoir se

glisser dans un trou de mur. Il existe aussi des robots miniaturisés longs de quelques millimètres et pesant quelques grammes. Un drone d'observation construit par la Société *AeroVironment* pour le combat urbain ressemble ainsi à un colibri qui ferait du sur-place au-dessus d'une cible.

Selon certains chercheurs, les nanorobots, c'est-à-dire des structures de quelques milliardièmes de mètre, deviendront banals d'ici quelques décennies. Au combat, ces nanomachines pourraient former des essaims de « poussières intelligentes » détectant les ennemis, ou agissant au niveau cellulaire pour réparer des blessures... ou en infliger.

La possibilité de déployer des systèmes sans avoir à prendre en compte les limites physiologiques humaines a aussi des conséquences à l'autre extrémité, celle

des grandes tailles. Ainsi, *High Altitude Airship*, de la Société *Lockheed Martin*, est un dirigeable sans pilote conçu pour voler à plus de 19 800 mètres d'altitude pendant plus d'un mois tout en transportant un radar de la taille d'un terrain de football.

La deuxième nouvelle tendance dans la robotisation de la guerre est le remplacement et l'appui des soldats dans nombre de leurs rôles habituels. *QuinetiQ North America*, le constructeur du TALON évoqué plus haut, a introduit en 2007 le robot mitrailleur et lance-grenades MAARS, qui peut aussi remplacer une sentinelle ou un tireur embusqué. Outre ce genre de rôle offensif, il existe aussi des robots médicaux, tel le « véhicule robotisé d'extraction » du Service des matériels de recherche médicale de l'armée américaine (*US Army Medical Research and Materiel*

Command). Il est conçu pour mettre les soldats blessés à l'abri, puis leur administrer les premiers soins.

Une autonomie accrue

La troisième nouvelle tendance perceptible dans la robotisation de la guerre découle du fait que la croissance incessante de la puissance de calcul confère aux robots des capacités de décision toujours plus grandes. Ceux qui entament une carrière militaire connaîtront sans doute avant la fin de leur service des robots un milliard de fois plus efficaces que les robots d'aujourd'hui ! S'agissant d'armement moderne, la notion d'« intelligence » est devenue un critère essentiel. Les avions sans pilote de la série *Predator*, par exemple, étaient à l'origine des machines télécommandées ; ce

ANATOMIE D'UN ROBOT DE PROCHAINE GÉNÉRATION

Les performances des robots militaires en cours de développement dépasseront largement celles des humains et des machines ordinaires. Ainsi, le système *BigDog*, sorte de quadrupède mécanique, peut se déplacer sur les terrains

les plus accidentés, boueux ou enneigés, inaccessibles aux véhicules à roues ou à chenilles. Il peut transporter des centaines de kilogrammes de munitions ou de tout autre ravitaillement ou équipement.

Système de géolocalisation

La position du robot est connue en permanence grâce à un système de géolocalisation (GPS) embarqué.

Ordinateur

Les données fournies par les capteurs servent à calculer la vitesse et l'accélération, et à commander les actionneurs afin de mouvoir les pattes de la façon la plus appropriée.

Moteur et système hydraulique

Un moteur actionne la pompe qui met sous pression l'huile dans les systèmes hydrauliques, de façon à mouvoir les actionneurs.

Yeux électroniques

Un lidar (radar à courte portée utilisant un rayon laser) ainsi qu'un système de vision balaient les environs immédiats.

Capteur de force

Servovalve

Capteur de position

Actionneur

Capteurs et actionneurs

L'ordinateur de bord reçoit, transmises par les capteurs, les données de position de la patte et des forces qu'elle subit. À partir de ces informations, il calcule l'ordre à envoyer à une servovalve qui s'ouvre et laisse l'huile entrer dans l'actionneur (un cylindre avec des pistons). L'actionneur met ainsi la patte dans la position requise.



3. UN SOLDAT JETTE UN PACKBOT à travers une fenêtre avant de se mettre à l'abri. Les caméras vidéo du robot lui permettront d'explorer les lieux.

sont aujourd'hui des systèmes autonomes, capables de décoller et d'atterrir tout seuls, et de traquer jusqu'à 12 cibles. Leur logiciel de reconnaissance est par exemple capable de remonter des empreintes jusqu'à celui qui les a créées...

Ces capacités impressionnantes n'empêchent pas l'armée américaine de réclamer toujours plus de performances, puisqu'elle est actuellement sur le point de remplacer les *Predators* déployés depuis 1995 par une nouvelle génération de drones.

Le développement de l'autonomie des robots soulève la question des tâches qu'il convient ou non de sous-traiter aux machines. Les décisions de déploiement devront être prises non seulement en fonction de l'efficacité militaire des robots, mais aussi des conséquences opérationnelles, politiques, légales, éthiques du déplacement de la prise de décision du poste de commandement humain vers un système automatique.

Dans un avenir proche, le plus probable est que les robots deviendront une sorte d'auxiliaires de combat. Des équipes mixtes d'hommes et de machines travailleront ensemble, chacun faisant ce qu'il sait faire le mieux. Le soldat dirigera l'attaque sans y participer sur le terrain; même aux ordres, le robot-soldat aura par ailleurs assez d'autonomie pour réagir aux changements de circonstances.

Ces premières perspectives ne fournissent en fait qu'une faible indication de la direction prise par la robotique militaire et de ses conséquences dans les guerres futures. Comment pourrait-on en

effet se représenter de façon réaliste les conséquences de l'introduction de la poudre sur la guerre en se contentant de décrire son comportement chimique et ses conséquences quant à l'allongement de la trajectoire des projectiles? Comme la poudre en son temps, les robots sont l'une de ces inventions qui modifient radicalement les règles du jeu. Comme chaque fois qu'une rupture s'est produite dans la conduite de la guerre, ces nouveaux systèmes techniques ne donneront pas d'avantage décisif à l'un des camps. Les robots entraîneront plutôt de vastes restructurations de l'activité guerrière, non seulement sur le champ de bataille, mais aussi chez les militaires, voire dans la société.

L'avantage donné au camp pionnier n'est que temporaire

Un parallèle historique entre ce qui se passe aujourd'hui et ce qui se passait avant la Première Guerre mondiale est sans doute éclairant à ce propos. De nouveaux moyens techniques, qui, quelques années auparavant, relevaient de romans d'anticipation, ont alors été introduits, puis utilisés de plus en plus souvent dans les combats.

C'est la nouvelle *Les Cuirassés de terre* de H. G. Wells, parue en 1903, qui a poussé le premier lord de l'amirauté Winston Churchill à accélérer le développement du char d'assaut. C'est dans une nouvelle

diale, mais les militaires allemands les avaient déjà surpassés au début de la Seconde Guerre mondiale: en mettant en œuvre la tactique de la guerre éclair – *Blitzkrieg* –, ils ont montré au monde comment exploiter le plein potentiel de la cavalerie blindée.

L'arrivée des chars d'assaut, des avions et des sous-marins n'a pas seulement changé la donne opérationnelle. Elle a aussi posé tout un ensemble de questions politiques, morales et légales. Les États-Unis sont par exemple entrés en guerre contre l'Allemagne pendant la Première Guerre mondiale parce qu'ils n'avaient pas la même appréciation que les Allemands de l'utilisation légale des sous-marins (à cause du torpillage du paquebot *Lusitania*, puis de la reprise par les Allemands de la guerre sous-marine à outrance). Pouvait-on couler des navires marchands sans avertissement? C'est cette entrée en guerre qui a donné aux États-Unis leur statut de grande puissance.

De même, les avions, qui se sont révélés si utiles pour repérer et attaquer des troupes, ont aussi bombardé les populations civiles.

Les mêmes processus semblent en cours avec la robotique militaire. Dans les États démocratiques, l'entrée en guerre a longtemps signifié un engagement sérieux, pour lequel il fallait obtenir l'approbation du grand public, puisqu'il s'agissait d'une entreprise mettant en danger la vie des citoyens, voire la survie de l'État. Avec des systèmes automatiques, les dirigeants ont moins de difficultés à obte-

LE SOLDAT DIRIGERA L'ATTAQUE

sans y participer sur le terrain. Même aux ordres, le robot-soldat aura par ailleurs assez d'autonomie pour réagir...

de A. A. Milne, le créateur de *Winnie l'ourson*, qu'a été lancée pour la première fois l'idée d'utiliser des avions pour combattre, tandis qu'Arthur Conan Doyle dans sa nouvelle de 1914 *Danger!* et Jules Verne dans son roman de 1869 *Vingt mille lieues sous les mers* ont introduit la notion de sous-marins armés.

Cependant, depuis que la guerre existe, chaque fois qu'un camp a utilisé une arme nouvelle, l'avantage a été de courte durée. Les militaires britanniques furent les pionniers de l'utilisation du char d'assaut pendant la Première Guerre mon-

nir l'accord des citoyens; aux États-Unis, cet effet était perceptible dès la fin de la conscription, en 1979.

L'augmentation de la distance entre le combattant humain et le théâtre du conflit pourrait bien rendre les guerres plus faciles à déclencher, et pourrait aussi modifier notre façon de les envisager. Les États-Unis ont par exemple effectué plus de 130 frappes aériennes au Pakistan au moyen de drones *Predator* et *Reaper*, plus que le nombre total de frappes de bombardiers classiques au début de la guerre du Kosovo il y a une dizaine d'années.

Toutefois, contrairement à ce qui s'était passé pour la guerre du Kosovo, ces nouvelles frappes aériennes n'ont donné lieu à aucun débat au Congrès et n'ont eu que peu d'échos dans la presse. De fait, les États-Unis sont en train de livrer au Pakistan ce que nous aurions autrefois appelé une « guerre », mais sans débat public préalable. Ce conflit n'est même pas considéré comme une guerre, parce qu'il ne coûte pas de vies américaines... Or ces frappes ont été très efficaces, puisqu'elles ont entraîné la mort d'une quarantaine de chefs d'*al-Qaida*, de talibans ou de groupes alliés, et cela sans risques pour des soldats ou des pilotes américains. Pour autant, ces frappes soulèvent des questions qui restent sans réponses.

Quel est par exemple l'effet de la robotique militaire sur la « guerre des idées » prônée du côté américain pour contrer le recrutement et la propagande terroristes ? En d'autres termes, comment et pourquoi nos efforts pour agir avec précision sont-ils si mal perçus et compris aux antipodes ? Alors que, dans nos médias, nous qualifions les frappes des drones de « précises » et « sans pertes », elles conduisent l'un des principaux journaux pakistanais à traiter les États-Unis de « principale bête noire » et de « bouc émissaire universel ». *Drone* est malheureusement devenu un mot courant en ourdou, et il apparaît aussi dans des chansons de rock écrites pour accuser les États-Unis de ne pas combattre dans l'honneur.

Faire la guerre sans en avoir l'air

La question devient plus complexe encore quand il s'agit de juger les responsabilités en cas de bavures. Le nombre estimé des victimes civiles est compris entre 200 et 1 000. Beaucoup de ces incidents se sont déroulés là où se trouvaient des chefs terroristes. Où passe la ligne entre les civils et les cibles ?

Aujourd'hui, le sens de l'expression « partir à la guerre » a aussi changé du point de vue des soldats. L'éventualité de ne pas en revenir était toujours associée à l'idée de guerre. Achille et Ulysse ont pris la mer pour combattre Troie, mon grand-père s'est embarqué pour combattre les Japonais après l'attaque de Pearl Harbor. La guerre robotique change cette logique millénaire.

Un nombre croissant de « combattants » se lèvent le matin, se rasent, puis

embrassent femme et enfants après le petit-déjeuner avant de prendre le volant pour aller « combattre » devant des écrans un ennemi qui se trouve à 11 000 kilomètres d'eux. À la fin de leur journée de « guerre », ils laissent les commandes de leur robot à un collègue et rentrent chez eux. Comme m'a dit un officier de l'armée de l'air américaine : « En 20 minutes, on se retrouve à table en train de bavarder avec les enfants. » Finalement, la partie la plus dangereuse de la journée d'un tel combattant est le trajet en voiture qui le conduit au front virtuel !

Cette coupure avec le champ de bataille conduit aussi à une nouvelle répartition des rôles, ce qui entraîne nombre de nouveaux problèmes pour le militaire. D'abord, son identité change : de jeunes recrues accomplissent désormais

DES ROBOTS DE TOUTES SORTES

Au sol comme dans les airs, de grandes ou de petites machines se chargent de plus en plus souvent des tâches accomplies jusque-là par les soldats.

Un dirigeable de haute altitude capable de rester un mois dans les airs transporte un radar de la taille d'un terrain de football.

Un drone oiseau-mouche mesurant quelques centimètres bat des ailes pour rester en vol stationnaire et scruter la scène avec ses caméras.

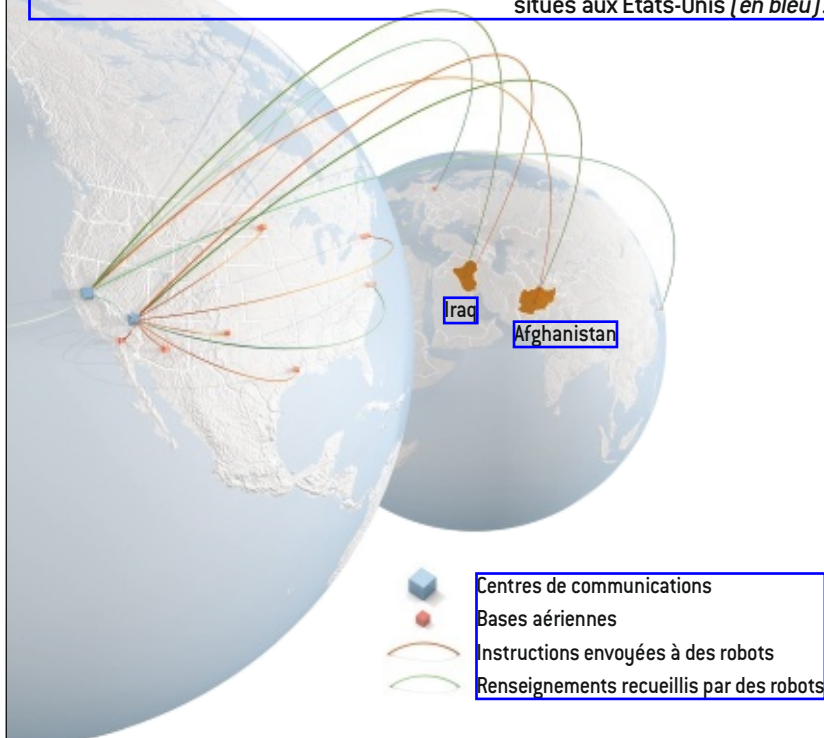
Le drone espion *Raven* a été très utilisé par l'infanterie américaine en Iraq. De la taille d'un oiseau, il peut être lancé à la main et résiste en général sans dommage à environ 200 atterrissages.

Le MAARS est un robot mitrailleur et lance-grenades de 160 kilogrammes, qui peut remplacer une sentinelle ou un tireur embusqué.

Le *Chembot* ressemble à une masse informe de la taille de la paume de la main ; il est capable d'adopter la forme nécessaire pour passer dans un trou et voir ce qui se passe de l'autre côté du mur.

UNE GUERRE AÉRIENNE TÉLÉCOMMANDÉE

Le réseau de communications de l'armée de l'air américaine permet à des militaires situés aux États-Unis ou sur des bases à l'étranger de contrôler des drones offensifs (porte-missiles) et des drones d'observation sur les théâtres d'opérations irakiens et afghans. Chaque base est responsable du contrôle d'un ou de plusieurs types de drones (*lignes orangées*) ou du recueil des renseignements (*lignes vertes*). L'information transite par deux centres de communications situés aux États-Unis (*en bleu*).



réagir assez vite pour détruire roquettes et missiles incidents. L'homme fait certes partie du processus de décision, mais surtout à l'étape initiale de la programmation du robot. Pendant le fonctionnement proprement dit de la machine, l'opérateur n'exerce qu'un pouvoir de veto, et l'initiative de bloquer une décision automatique doit être prise en une demi-seconde ; or peu de personnes sont en mesure de remettre en cause aussi vite le jugement de la machine, qu'elles tendent à considérer comme plus sûr que le leur.

De nombreux observateurs affirment que l'automatisation réduira le nombre d'erreurs et garantira une meilleure application des règles de la guerre, comme si le déroulement d'une guerre pouvait être assimilé à l'exécution d'un programme par un processeur.

Notre vision de la guerre est en pleine mutation

Cette vision des choses ne tient pas compte de la complexité du théâtre des opérations. Un système automatique a beau être capable de repérer un homme portant une *Kalachnikov* à un kilomètre, et de déduire de la signature thermique de son arme s'il s'en est servi récemment, il lui sera tout aussi difficile qu'à un soldat humain de savoir si cet homme est un ennemi, un membre d'une milice alliée ou un simple commerçant contraint de s'armer pour se protéger.

Toute la technologie du monde ne dissipera jamais le caractère trouble de la guerre, contrairement à ce qu'ont cru un moment Donald Rumsfeld, l'ancien secrétaire d'État à la Défense américain, et les partisans du « champ de bataille numérique ». Ainsi, on raconte que le système C-RAM, pourtant perfectionné, prit un jour un hélicoptère américain pour cible à cause d'une erreur de programmation. Heureusement, personne ne fut blessé.

Ce ne fut hélas pas le cas en 2007, lorsqu'un canon antiaérien automatique sud-africain de 35 millimètres se mit à tirer à l'horizontale au cours d'un exercice et ne s'arrêta qu'une fois à court de munitions. Cet accident dû à un « problème logiciel » fit neuf victimes. De tels incidents soulèvent d'importantes questions légales. Qui est responsable ? Quel cadre légal guide la réflexion ? Ces cas illus-

des tâches autrefois dévolues aux seuls officiers supérieurs ; le guerrier d'autrefois devient de plus en plus souvent un technicien. Ensuite, c'est la nature de son engagement qui change radicalement : certes, les opérateurs à distance semblent jouer à des jeux vidéo, mais ils subissent une intense pression psychologique, puisque des vies au sol dépendent de la qualité d'exécution de leurs missions. Les officiers supérieurs le disent : s'il est très différent de celui d'une unité de combat au sol, le commandement d'une unité de combat à distance est parfois plus difficile encore.

Chaque fois qu'une étape est franchie dans le caractère meurtrier et l'autonomie des armements, le rôle humain dans le circuit de prise de décision militaire diminue. Le rythme de la guerre est devenu tel, que seuls des systèmes comme le C-RAM (*Counter-Rocket Artillery and Mortar*), une sorte de robot R2-D2 de la *Guerre des étoiles* auquel on aurait attaché une mitrailleuse de 20 millimètres, sont capables de

BIBLIOGRAPHIE

Bombs away, *The Economist*, *Technology Quarterly*, p. 13, 4 mars 2010.

P. W. Singer, *Wired for War: The Robotics Revolution and Conflict in the 21st Century*, Penguin, 2009.

Entretien avec P. W. Singer, *Robotique et adversaires irréguliers : du bricolage à la bataille des narrations*, *Défense et Sécurité Internationale*, hors-série n° 10 ; en ligne sur : www.dsi-presse.com/?p=2662

P. W. Singer, *The Regulation of New Warfare*, en ligne sur : www.brookings.edu/opinions/2010/0227-defense-regulations-singer.aspx

trent une fois de plus le fait que la technique progresse souvent plus vite que nos structures sociales. Comment concilier les lois de la guerre du XX^e siècle avec la réalité d'aujourd'hui ?

Notre vision de la guerre, nos définitions de celle-ci, de sa conduite, nos avis sur qui doit combattre, etc., tout cela est en pleine mutation sous la pression des possibilités immenses de la robotique. L'humanité a déjà connu de pareilles étapes. Souvent, nous avons du mal à intégrer et à comprendre de nouvelles techniques que quelque temps plus tard nous trouvons normales, alors que nous les trouvons étranges et inacceptables au départ. Une bonne illustration de ce phénomène est cet aristocrate français du XV^e siècle selon qui les mousquets étaient des outils de meurtrier, qu'un soldat qui se respecte ne peut utiliser. « Seuls les lâches, écrivit-il, n'oseraient regarder en face les hommes qu'ils abattent à distance avec leurs maudites balles. »

Nous avons « progressé » depuis, mais la même chose se produit avec la

robotique. Maîtriser ces technologies se révélera beaucoup plus facile que résoudre les dilemmes d'ordre moral que posent ces machines. C'est pourquoi, d'après certains chercheurs, les développements de la robotique sont à rapprocher non pas de l'avènement du pistolet

années 1940, les pères actuels des robots poursuivent leurs travaux parce qu'ils sont militairement utiles, très lucratifs et à la pointe de la science. Comme l'aurait dit Einstein : « Si nous savions ce que nous faisons, cela ne s'appellerait plus de la recherche, n'est-ce pas ? »

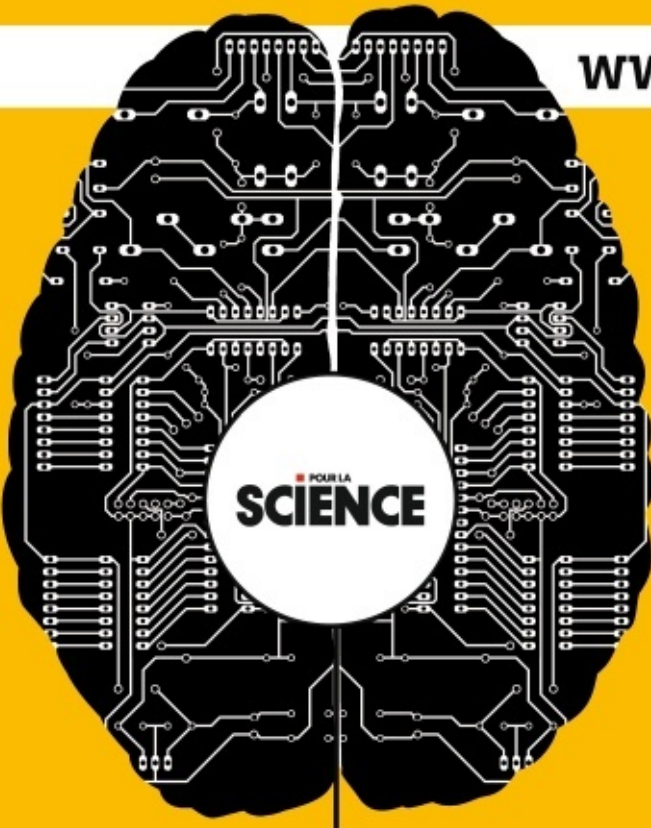
UN ARISTOCRATE FRANÇAIS DU XV^e SIÈCLE

disait à propos des mousquets : « Seuls les lâches n'oseraient regarder en face les hommes qu'ils abattent à distance avec leurs maudites balles. »

ou de l'avion, mais plutôt de celui de la bombe atomique.

Nous sommes en train de créer un nouveau type de machines qui, certes, repoussent les frontières de la technologie, mais suscitent tant de préoccupations que nous pourrions en venir à déplorer l'invention des robots, comme certains ont déploré celle des ogives nucléaires. Comme les constructeurs de la première bombe atomique dans les

La morale de l'histoire est que ce qui n'était que des scénarios de science-fiction doit aujourd'hui être discuté sérieusement, et pas seulement au Pentagone. L'histoire des robots militaires est d'importance non seulement dans les laboratoires, dans les rencontres professionnelles et sur les champs de bataille concernés, mais pour l'humanité toute entière. Depuis des millénaires, l'homme avait le monopole de la guerre ; ce monopole a pris fin. ■



www.pourlascience.fr

Restez en contact avec l'actualité scientifique.

Retrouvez *Pour la Science* partout sur le web :

-  Rejoignez-nous sur Facebook
<http://bit.ly/pls-facebook>
-  Suivez-nous sur Twitter
<http://twitter.com/PourLaScience>
-  Abonnez-vous à nos flux RSS
<http://bit.ly/pls-rss>
-  Recevez nos lettres d'information
<http://bit.ly/pls-newsletters>
-  Visitez notre site Internet
<http://www.pourlascience.fr>

L'artisanat textile au Proche-Orient ancien

Cécile Michel

L'artisanat textile mésopotamien a laissé peu de traces matérielles. Néanmoins, leur étude et l'examen des textes cunéiformes révèlent l'importance de la production textile et des fonctions sociales attachées aux vêtements.

« Je te regarde, Enkidou, tu es comme un dieu. Pourquoi parcoures-tu la steppe avec les bêtes sauvages ? Viens, je veux te conduire à Ourouk [...]. Les suggestions de la femme pénétrèrent son cœur. Elle ôta ses vêtements, de l'un, elle le vêtit, de l'autre elle se couvrit. »

Épopée de Gilgamesh, début du II^e millénaire avant notre ère.

Enkidou, l'homme sauvage, fut créé par les dieux pour limiter les abus de Gilgamesh, roi tyrannique d'Ourouk. Il allait nu dans la steppe quand on lui envoya une prostituée pour l'appivoiser. Ayant accompli sa mission, celle-ci, avant de l'amener à la civilisation, lui apprit à se vêtir. Ainsi, l'épopée de Gilgamesh – de même que d'autres compositions littéraires sumériennes et akkadiennes – a gardé la mémoire de l'homme à l'état sauvage, c'est-à-dire non vêtu.

Comme nous allons le voir, les civilisations du Proche-Orient sont aussi celles qui ont fait passer le vêtement de son rôle de seconde peau protectrice au... prêt-à-porter. En chemin, elles ont inventé la production à grande échelle de fils et de tissus, le commerce et l'industrie du textile, et créé le vêtement aux fonctions

multiples que nous connaissons. À l'origine, le vêtement avait pour rôle fondamental de protéger le corps de la chaleur, du froid et du vent ; il s'est sans doute peu à peu substitué aux peaux dont se vêtaient les hommes préhistoriques. Quand ? Les empreintes de textiles trouvées en certains sites du Paléolithique supérieur, il y a près de 30 000 ans, par exemple à Pavlov en République tchèque, prouvent que les hommes de cette époque savaient créer des fils solides en fibres végétales et connaissaient les gestes de base du tissage.

Des traces indirectes et surtout des textes

Au Proche-Orient ancien, vaste région qui s'étend de l'Anatolie à l'Iran et du golfe Arabo-Persique au Kurdistan, l'apparition du vêtement a été concomitante du développement de l'agriculture et de l'élevage, à partir du IX^e millénaire avant notre ère.

Malheureusement, l'artisanat du textile, tout comme la vannerie, à laquelle il est fortement apparenté, a laissé très peu de traces dans cette région dont le climat est défavorable à la conservation des matériaux organiques. Les vestiges les plus anciens se présentent sous la forme d'as-

semblages, réalisés à l'aiguille, de fibres végétales pour confectionner des filets de pêche ou de portage.

Les premières traces de toile tissée, sous forme d'empreintes, ont été découvertes à Jarmo, dans les piémonts du Zagros central (montagnes situées à la frontière Iraq-Iran). Elles datent du VII^e millénaire. Le tissage sur métier ne serait ainsi pas antérieur à cette époque. Mais nos connaissances sur la question devraient progresser : depuis quelques années, les sites du Proche-Orient ancien, et surtout les sépultures, font l'objet de fouilles plus minutieuses, permettant de déceler les microrestes organiques. Önan Tunca, de l'Université de Liège, a ainsi recueilli en 2008 et 2009, à Chagar Bazar en Syrie, une douzaine de minuscules échantillons de textiles.

Toutefois, il faut bien constater à ce stade une quasi-absence de sources archéologiques directes, à savoir de restes de tissus. Les spécialistes compensent ce manque

1. LA FILEUSE, œuvre aujourd'hui conservée au musée du Louvre, provient d'un bas-relief découvert à Suse, l'une des principales villes du pays d'Élam, voisin de la Mésopotamie. Ce bas-relief date de la période néo-élamite (VIII^e-VI^e siècles avant notre ère).

en concentrant leurs efforts sur les empreintes de textiles, découvertes principalement sur l'argile : étiquette apposée sur un ballot d'étoffes, traces de textiles ayant servi à recouvrir des céramiques, etc. (voir l'encadré page 57). Dans le meilleur des cas, ces empreintes permettent de déterminer le type de tissage, voire la nature des fils.

Les outils de l'artisanat textile reçoivent aussi l'attention des chercheurs. Il ne s'agit pas des cadres en bois des métiers à tisser, qui ont eux aussi disparu, mais des fusaïoles (des anneaux servant de volant d'inertie aux fuseaux) et des poids de métiers verticaux, nombreux dans les fouilles. L'archéozoologie et l'archéobotanique aident aussi à identifier les fibres animales et végétales utilisées. Les sources iconographiques – statuaire, bas-reliefs et sceaux – forment une documentation de premier ordre sur les vêtements, mais il convient de faire la

part due à l'artiste et celle due aux codes de représentation.

S'agissant du Proche-Orient ancien, nous avons aussi la chance de disposer, à partir de la seconde moitié du IV^e millénaire, d'une énorme quantité de textes cunéiformes, dont beaucoup restent à déchiffrer. Cette documentation témoigne d'importants mouvements de biens ayant pour conséquence la mise en place de pratiques administratives de plus en plus complexes, qui concernaient à la fois les animaux d'élevage, les matières premières et les produits manufacturés, dont les textiles.

À part les sources officielles provenant des palais et des temples, les maisons privées ont aussi livré de nombreuses archives cunéiformes à partir du début du II^e millénaire, apportant parfois des informations sur la production domestique d'étoffes et sur l'importance de la nomenclature des textiles et vêtements.

L'ESSENTIEL

✓ Rares sont les vestiges matériels de tissus, mais de nombreux textes nous renseignent sur les textiles au Proche-Orient ancien.

✓ La production de toile avec des métiers à tisser ne serait pas antérieure au VII^e millénaire avant notre ère.

✓ D'abord en lin et en diverses fibres végétales, les étoffes ont ensuite été surtout fabriquées en laine.

✓ Les vêtements se sont peu à peu diversifiés et chargés d'une valeur symbolique et sociale.



Grâce à toutes ces sources, les historiens et les archéologues ont aujourd'hui reconstitué de nombreux faits relatifs à la production textile dans le Proche-Orient ancien.

Le lin figure parmi les premières plantes textiles cultivées par l'homme, comme l'attestent des graines de la fin du VIII^e millénaire découvertes à Ramad, en Syrie. Mais d'autres plantes ont pu, très tôt, être utilisées pour faire des tissus, des cordages ou des nattes. Ainsi, des tombes d'Arslantepe, en Anatolie (début du III^e millénaire) et d'Ebla, en Syrie (début du II^e millénaire) présentaient des restes de textiles dont les fibres n'ont pu être identifiées.

Les étapes du travail du lin sont illustrées par un dialogue entre le dieu Soleil Outou et sa sœur Inanna, relatif à la préparation d'un drap destiné à la couche nuptiale de la déesse. On y apprend ainsi qu'il faut bêcher pour arracher la plante, la peigner, la filer, la tresser, l'ourdir (réunir les fils de chaîne d'une étoffe, les tendre avant le tissage), la tisser et la teindre.

Le travail du lin est aussi documenté par les textes provenant des temples néobabyloniens (de 612 à 539 avant notre ère). Après cueillette, le lin était roui (séparation des fibres), peigné et fourni en poignées à des artisans spécialisés qui le filaient et le tissaient. Ceux rattachés au temple du dieu Shamash à Sippar durent traiter, en trois ans, 21 600 poignées de lin. Les étoffes obtenues étaient confiées au blanchisseur qui les mettait à bouillir pour en garantir la blancheur. La finesse et le blanc d'une pièce de lin en faisaient la grande valeur.

Le lin était très présent dans la confection des vêtements au IV^e millénaire et au début du III^e. Il est devenu plus rare à la fin du III^e et au II^e millénaire, où il était importé d'Ebla, en Syrie. Au I^{er} millénaire, ce matériau textile noble est privilégié dans les étoffes destinées aux divinités et au culte; mais dans les autres usages, le lin a été depuis longtemps supplanté par la laine.

En effet, au début du IV^e millénaire, l'élevage ovin se généralise. La laine prend dès lors une place de plus en plus importante et devient au III^e millénaire l'un des éléments de base de l'économie mésopotamienne, puisqu'elle sert désormais à la production de la majorité des étoffes. Dans le Sud de la Mésopotamie, au début du II^e millénaire, des marchands sont embauchés par le palais pour commercialiser les surplus produits par les troupeaux

du roi. De nombreuses variétés et qualités de laine sont citées selon l'âge, l'alimentation ou l'origine de l'animal, la teinte naturelle de sa toison, ou encore la période à laquelle elle a été prélevée sur le dos de la bête. On trouve aussi des textiles plus grossiers faits de poils de chèvres.

Sans doute originaire de la vallée de l'Indus, le coton n'apparaît que très tardivement en Mésopotamie. Selon une datation au radiocarbone effectuée au milieu des années 1990 par Alison Betts, de l'Université de Sydney, il est attesté dès le IV^e millénaire à Dhuweila, aujourd'hui en Jordanie.

On exploitait alors très certainement des variétés sauvages. Des fragments de coton datant de la fin du VIII^e siècle ont été découverts dans les tombes royales de Kalhou (Nimroud, sur le Tigre). D'après ses annales, Sennachérib, roi d'Assyrie

(de 704 à 681), a fait planter dans les jardins qui entourent son palais à Ninive des «arbres portant de la laine», ajoutant que «l'on tondit les arbres portant de la laine, [que] l'on tissa pour en faire des vêtements». Une précision qui illustre l'omniprésence de la laine et suggère la relative rareté du coton, puisqu'on l'assimilait à un substitut végétal de la laine.

La laine, dominante dès le IV^e millénaire

De fait, l'iconographie et la documentation cunéiforme sumérienne et akkadienne mettent plutôt l'accent sur le travail de la laine. Pour la tonte des moutons, au printemps, les bêtes étaient baignées afin d'éliminer le maximum de poussière de leur toison. Anciennement, la laine était épilée à la main; cette pra-



tique était adaptée aux espèces alors élevées, qui muaient tous les ans. Au I^{er} millénaire, on coupait la laine au couteau sur le dos de l'animal, où la pousse était désormais continue (les moutons ne muaient plus). Puis les bergers triaient, pesaient et rassemblaient la laine en balots avant de l'apporter au palais. D'après les archives du parc à bestiaux de Pouzrish-Dagan (XXI^e siècle avant notre ère), un animal donnait environ 800 grammes de laine, certaines bêtes en produisant plus d'un kilogramme.

Après la récolte de la laine, il faut la filer, puis tisser, un travail tout d'abord pratiqué en contexte domestique, souvent par les femmes. Elles produisaient les textiles pour vêtir leurs proches et pour l'ameublement de la maison. Quelques textes bibliques confirmeraient le rôle important tenu par les femmes dans la production des tex-

tils: « Toutes les femmes douées de sagesse filèrent de leurs mains et apportèrent, déjà filés, la pourpre violette et la pourpre rouge, le cramoisi éclatant et le lin; toutes les femmes douées de sagesse filèrent le poil de chèvre. » Exode, 35, 25-26

Les très nombreuses fusaïoles découvertes dans les habitations et dans les tombes de femmes témoignent d'une constante activité de filage à l'aide d'un fuseau, sur lequel était fixée la fusaïole, et d'une quenouille servant à stocker les fibres à filer (voir la figure 1). Cependant, les textes cunéiformes mentionnent aussi des tisserands, notamment dans les ateliers de fabrication de textiles.

Les fusaïoles présentent des formes différentes selon leur matière: os, argile, pierre ou métal. Celles, nombreuses, découvertes sur le site d'Arslantepe ont servi à des expérimentations archéologiques menées

L'AUTEUR



Cécile MICHEL est directrice de recherche au CNRS et responsable de l'équipe HAROC (Histoire et archéologie de l'Orient cunéiforme) du Laboratoire Archéologie et sciences de l'Antiquité, à la Maison René-Ginouvès, Archéologie et ethnologie, à Nanterre.

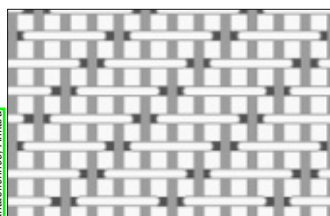
LES DEUX PRINCIPALES TECHNIQUES DE TISSAGE

Plusieurs types de métiers à tisser existaient au Proche-Orient ancien, notamment le métier horizontal et le métier vertical. Le premier, peut-être hérité du Néolithique, compte parmi les plus simples. Il suppose la mise sous tension des fils de chaîne divisés en deux nap-

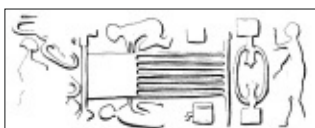
pes et maintenus par les ensouples (barres en bois). Les deux nappes permutent l'une par rapport à l'autre pour permettre le passage de la navette au moyen d'un système de lisses et d'une planchette que l'on dispose à plat ou dressée. Sur certains métiers verticaux, la

chaîne est lestée par des poids. Le métier vertical à poids permet de réaliser des étoffes plus compliquées, avec des motifs de couleur ou des jeux d'armure, en sélectionnant les groupes de fils au moyen de baguettes. Les métiers les plus simples étaient sans doute utilisés à la

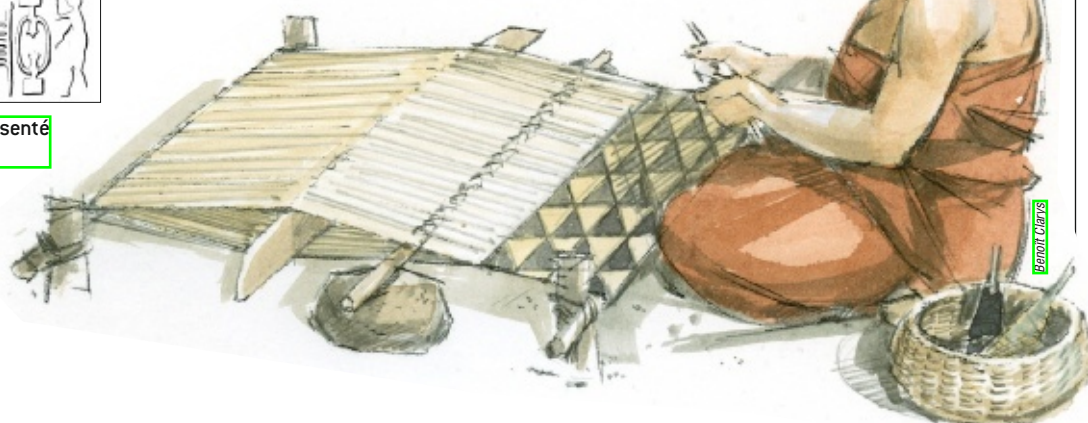
maison par les femmes mésopotamiennes, dont la production était essentiellement domestique. Adaptés à des productions plus élaborées, les métiers verticaux étaient probablement des instruments d'atelier employés par des artisans, hommes ou femmes.



LE SERGÉ représente l'un des types d'entrecroisement des fils de chaîne et des fils de trame. Comme l'illustre cette impression fortuite d'un tissu sur une tablette d'argile qu'il servait à envelopper, il se caractérise par la présence de côtes obliques sur l'endroit.



Un métier vertical représenté sur un sceau.





2. LE KAUNAKES était une sorte de jupe constituée de volants à mèches superposées, imitant une fourrure. Il est souvent figuré sur la statuaire de la période protodynastique, comme sur cette statue en gypse, coquille et lapis-lazuli de l'intendant Ebih-II de Mari, datée d'environ 2 400 ans avant notre ère et conservée au musée du Louvre.

entre 2007 et 2009 au Centre de recherche sur le textile de Copenhague. Ces expériences ont fait apparaître que, selon la qualité de la fibre, le poids et le diamètre du fuseau, on peut définir la nature du fil obtenu et sa finesse. Les fusaïoles analysées indiquent par exemple que les fileurs d'Arslantepe, à la fin du IV^e millénaire, produisaient des types de fils très différents, fins ou épais, serrés ou lâches.

Le tissage, activité saisonnière surtout liée au cycle agricole, n'a guère laissé de traces dans les habitations du Proche-Orient ancien. Les métiers à tisser en bois n'ont pas survécu au temps ; seuls subsistent les signes en négatif de leur présence, tels les trous de poteaux, ou certains de leurs éléments fonctionnels, tels les poids des métiers verticaux.

Catherine Breniquet, de l'Université Blaise-Pascal à Clermont-Ferrand, a montré en 2008 que différents types de métiers ont été utilisés, dont un métier horizontal et un métier vertical à poids. Celui-ci requiert en outre l'usage préalable d'un métier à ourdir composé de trois piquets. Le métier à poids peut comporter des tablettes disposées latéralement pour assurer les finitions du tissu. Il est possible que les bandes ainsi obtenues soient figurées sur le vêtement drapé du roi de Lagash Goudéa (voir la figure 3).

Au III^e millénaire, le métier horizontal aurait été supplanté par le métier vertical à poids, utilisé pour le tissage de la laine lors de la mise en place d'ateliers de tissage et l'apparition de vêtements formés de grandes pièces de tissus drapées ; les nombreux pesons en forme de pyramides, disques, tubes, croissants, percés d'un ou deux trous, témoignent de son usage.

La documentation cunéiforme révèle l'apparition d'une véritable industrie textile dès le milieu du III^e millénaire. De grands ateliers de filage et de tissage, qui dépendent des institutions, engendrent de nombreux documents administratifs précisant la quantité de laine travaillée, la production d'étoffes par travailleur, le prix de revient d'un coupon, etc.

Un texte cunéiforme datant de la fin du III^e millénaire publié par Hartmut Waetzoldt, de l'Université de Heidelberg, précise par exemple que pour produire une étoffe de type *bar-dul* avec de la laine de cinquième catégorie, il fallait deux kilogrammes de laine mélangée sachant qu'« une femme nettoie et peigne 125 grammes par jour, produit 1,5 kilogramme de

mèches par jour, que le fil de chaîne pour la faire pèse 650 grammes et qu'une femme file 17 grammes de fils fortement tordus (pour la chaîne) ; le fil de trame pour la faire pèse 835 grammes et une femme en produit 42 grammes par jour (pour la trame). » D'autres documents renseignent sur le nombre de journées nécessaires à une tisseuse pour obtenir une étoffe de dimensions données.

Production à grande échelle et production domestique

Les manufactures d'Ur III employaient plusieurs milliers de femmes pour accomplir des fonctions différentes, les moins qualifiées étant affectées au filage tandis que les plus qualifiées l'étaient au tissage. Les hommes assuraient plutôt l'encadrement et la finition des tissus ; certains étaient désignés comme maîtres tisseurs. Il fallait alors trois journées de travail féminin pour tisser entre 25 et 50 centimètres d'étoffe.

Outre cette production textile à grande échelle, la production domestique prenait parfois de l'ampleur. Au début du II^e millénaire, les femmes assyriennes excellaient si bien dans l'art du tissage que leurs étoffes étaient vendues à un millier de kilomètres de chez elles, en Anatolie centrale.

Afin d'améliorer leur production, elles recevaient des conseils de leurs époux informés de la demande sur les marchés anatoliens, où ils étaient présents : « Concernant l'étoffe fine que tu m'as envoyée, fabriques-en de pareilles et fais-les moi porter par Assour-idî, et je t'enverrai en retour une demie mine d'argent (par pièce). Que l'on frappe une seule face de l'étoffe, on ne doit pas l'éplucher, son tissage doit être dense. Par rapport aux précédentes étoffes que tu m'as envoyées, ajoute une mine de laine à chacune [des étoffes], mais qu'elles restent fines ! Que l'on frappe légèrement l'autre face, et si elle est pelucheuse, qu'on l'épluche tout comme [s'il s'agissait d']une étoffe de type *kutânûm*. [...] Une étoffe achevée que tu fabriques doit être de 9 coudées [4,5 mètres] de long et de 8 coudées [4 mètres] de large ! »

Selon C. Breniquet, les scènes miniatures des sceaux-cylindres, aux époques d'Uruk et Dynastique archaïque (3700 à 2330), illustreraient toute la chaîne opératoire.

ratoire du travail de la laine: pesée, étirage, filage à la quenouille et au fuseau, retordage, ourdissage, tissage sur un métier horizontal ou vertical, pliage des étoffes. Ces activités artisanales s'intégraient éventuellement à des activités culturelles.

Surtout du bleu et du rouge

Fils et textiles pouvaient être teints à l'aide de colorants végétaux ou animaux. De nombreux adjectifs renvoient à des couleurs dont les nuances sont parfois difficiles à distinguer. Le bleu, qui rappelle le lapis-lazuli, et le rouge, couleur portée par les rois, constituent les teintures dominantes. La pourpre obtenue à partir du murex (un coquillage), utilisé en très grandes quantités – il fallait quelque 8000 murex pour obtenir un gramme de colorant –, a fait son apparition à la fin du II^e millénaire sur le littoral levantin et sur les côtes du golfe Arabo-Persique.

L'artisanat traditionnel des femmes, celui des artisans spécialisés et l'apparition de véritables industries textiles ont créé, avec le temps, une très grande variété de produits: tapis et tentures pour l'ameublement, sacs, bandages, voiles de bateau, mais surtout vêtements. Les Mésopotamiens leur attachaient manifestement beaucoup de valeur, et ce sont leur finesse et leur qualité qui les rendaient souvent précieux. C'est pourquoi il paraissait indispensable de les protéger des mites et d'en prolonger l'existence en les ravaudant ou en les recyclant, comme emballages par exemple. Ainsi, à Babylone, au I^{er} millénaire, des ravaudeurs se spécialisaient dans la réparation des pièces de lin usées.

Toute cette variété se révèle dans la terminologie des textiles et des vêtements. Un colloque international, tenu à Copenhague en 2009 et organisé par Marie-Louise Nosch, du Centre de recherche sur les textiles, et moi, a souligné l'abondance de ces termes dans les textes cunéiformes. Ce

3. LA STATUE DE GOUDÉA (à gauche), prince de la cité-État de Lagash, montre le souverain vêtu d'une seule pièce de tissu drapée, qui laisse l'épaule droite dégagée. Cette statue en diorite, conservée au musée du Louvre, date d'environ 2 120 ans avant notre ère. Le haut de la stèle du code de Hammourabi (à droite) représente le souverain babylonien, à gauche, faisant face au dieu Shamash. Il porte le bonnet du souverain paléobabylonien, et est vêtu d'une seule pièce de tissu drapée, laissant aussi l'épaule droite dégagée. Cette œuvre datée du XVIII^e siècle avant notre ère est présentée dans la salle paléobabylonienne au musée du Louvre.





4. ASSOURBANIPAL, le dernier grand roi d'Assyrie (669-627 avant notre ère) est montré sur ce bas-relief découvert à Ninive dans un corps à corps avec un lion asiatique, qu'il est en train de transpercer de son épée.

Comme celui de l'archer qui l'accompagne, le manteau qu'il porte semble taillé pour l'action, puisqu'il libère le mouvement des genoux tout en protégeant le mouvement des chevilles.

riche vocabulaire fait apparaître d'importants particularismes régionaux.

Une même racine peut être employée durant de longues périodes pour désigner des étoffes très différentes. Le nom akkadien d'un textile en lin, *kitûm*, construit sur la racine sémitique *ktn*, a par exemple donné naissance à la longue chemise grecque *khiton*, déjà connue sous la forme *Ki-to* en linéaire B (écriture ayant servi à transcrire le mycénien, une forme archaïque du grec ancien). Or la même racine désigne aussi une étoffe faite en laine (*kutânum*) dans la documentation assyrienne du début du II^e millénaire. Elle a peut-être donné naissance au mot *kitinnu* dans les sources babyloniennes du VI^e siècle, et au terme « coton » dans plusieurs langues modernes. Certains corpus, telles les archives royales du palais de Mari (début du II^e millénaire), évoquent le vêtement coupé et cousu, généralement réservé à l'élite, tandis que les archives privées contemporaines appartenant aux marchands assyriens traitent surtout de pièces d'étoffes.

À quoi ressemblaient les vêtements confectionnés ? Une idée nous en est donnée par l'iconographie. De tels documents sont heureusement abondants, mais biaisés par les conventions auxquelles devaient se conformer les artistes ayant créé ces représentations. En outre, les textes et les images ne coïncident pas toujours.

Des codes vestimentaires

Ainsi, un texte religieux babylonien du début du II^e millénaire précise que les hommes doivent couvrir leur côté gauche tandis que les femmes doivent couvrir leur épaule droite ; or les représentations ne sont pas aussi systématiques, et quelques statues montrent les deux épaules couvertes... De même, selon les lois assyriennes de la seconde moitié du II^e millénaire, les femmes d'un certain statut social se couvraient la tête d'un voile, alors que dans l'iconographie, les femmes sont en général figurées nue tête !

Les premiers vêtements apparaissent dans les textes et dans l'iconographie vers la fin du IV^e millénaire. Dans les scènes représentées sur le vase d'Ourouk, vase datant d'environ 3000, haut de un mètre et conservé au musée de Bagdad, le vêtement est à l'évidence réservé à l'élite, les serviteurs étant représentés nus. Ainsi, comme aujourd'hui, l'habit, tout comme les bijoux, reflète le statut social de la personne. Jusqu'au II^e millénaire, il semble fait d'un seul tenant. Au IV^e millénaire, à Ourouk, il se résume à une simple jupe. Dans la première moitié du III^e millénaire, à l'époque protodynastique, le *kaunakès*, sorte de jupe à volants constitués de mèches superposées, fait son apparition (voir la figure 2).

Benjamin Foster, de l'Université de Yale, a récemment montré que le vêtement s'est diversifié à l'époque d'Akkad (XXIV^e-XXIII^e siècles) : aux côtés de la jupe ou du vêtement « en tuyau » sont apparus le drapé et la toge, confectionnés à partir d'une étoffe plus fine (voir la figure 3). Le drapé nécessitait de grandes pièces d'étoffe et devint

sophistiqué sous Goudéa, prince de Lagash, vers 2120. La toge, dont le tissu se termine par une frange faite des fils de chaîne, est restée à la mode à la cour babylonienne au début du II^e millénaire.

De nombreux textes administratifs consacrés aux textiles et vêtements ont été exhumés dans le palais de Mari, sur le moyen Euphrate. Publiés en 2009 par Jean-Marie Durand, professeur au Collège de France, ces documents nous apprennent par exemple que le roi de Mari s'habillait d'une chemise serrée à la taille par une écharpe ou une ceinture en cuir, par-dessus laquelle il enfilait une sorte de manteau couvert d'ornements divers.

Le roi adressa à ce sujet une lettre à l'un de ses hauts fonctionnaires : « Donne des ordres précis aux tailleurs et aux tisseuses. Il faut que cet habit, comme s'il était confectionné à Touttoub, soit tissé et noué de façon soignée de chaîne et de trame et que son intérieur ressemble à une feuille d'argent. On ajoutera à cet habit des ourlets à la mode du Yamhad et on lui appliquera du tissu teint [en doré] pour qu'il ressemble à une étoffe brodée d'or. Il ne faudrait pas qu'après avoir installé ensemble chaîne et trame, les ornements soient [trop] lourds au moment où on les enfilera et que l'habit ne se déchire. Donne des ordres stricts et que l'on fasse très attention à cet habit. Il sera exposé aux yeux de toute la population. »

C'est à l'époque paléobabylonienne que l'on s'est mis à faire des vêtements coupés et assemblés, avec ajout de poches, impressions et broderies. Le roi portait un bonnet à larges bords, typique de la période paléobabylonienne. Au I^{er} millénaire, à la cour assyrienne ou dans les sanctuaires babyloniens, les rois et les dieux (statués) portaient des vêtements colorés et très élaborés, composés d'un habit du dessous, sorte de tunique à manches longues, d'un manteau brodé et décoré de métaux et pierres précieuses, ceint à la taille par une écharpe, et d'un turban sur la tête.

Sur les bas-reliefs du palais d'Assurnazirpal II (883-859), à Kalhou, le roi et les génies ailés portent ainsi des manteaux ornés de galons brodés, dont les motifs reproduisent ceux des reliefs : arbres sacrés, créatures fantastiques ou scènes de chasse.

Pour les civilisations du Proche-Orient ancien, comme pour nous aujourd'hui, les vêtements n'avaient pas qu'une simple fonction de protection ou de dissimulation du corps. On l'a vu dans l'épopée

de Gilgamesh, se vêtir était une marque de civilisation. Et comme l'attestent les sources, les vêtements avaient une forte valeur symbolique et sociale.

Le vêtement ou une partie de celui-ci, comme ses franges, servait de lien social, voire de double de la personne. Ainsi, au I^{er} millénaire, quand il ne pouvait honorer un rendez-vous, le roi d'Assyrie envoyait son manteau ; de même, en l'absence de leur souverain, les Babyloniens se prosternaient devant son habit. Les particuliers pouvaient signer un document en imprimant dans l'argile la frange de leur vêtement à la place du traditionnel sceau-cylindre. Lors d'une alliance, on nouait les franges des vêtements, et on les coupait en cas de rupture.

Le vêtement, acteur des échanges sociaux

Les vêtements participaient aux échanges à tous les niveaux de la société. Les travailleurs, y compris ceux du textile, recevaient des céréales, de l'huile et de la laine ou un vêtement en guise de rémunération. Les jeunes mariées apportaient dans leur dot des vêtements et des tissus d'ameublement. À Assour ou à Nouzi, au II^e millénaire, le vêtement symbolisait même toutes les possessions de l'individu. Ainsi, dans les divorces prononcés aux torts de la femme, cette dernière devait ôter la fibule retenant son vêtement et déposer celui-ci pour quitter « nue » la maison, abandonnant par là symboliquement toute possession à son époux. Les rois et les particuliers paraient leurs hôtes d'une tunique en signe d'accueil, et de luxueux habits étaient échangés dans les cours royales à titre de cadeaux diplomatiques.

Pour chaque étape importante de sa vie, le Mésopotamien revêtait une tenue de cérémonie particulière. Par exemple, à sa mort, son corps était parfois enveloppé dans des linges, tandis que ses proches déchiraient leurs vêtements en signe de deuil... pratique qui a toujours cours aujourd'hui.

En quelques millénaires, les civilisations du Proche-Orient ancien ont ainsi développé une production quasi industrielle de tissus en fibres végétales ou en laine, sont passées de simples vêtements drapés à des vêtements coupés et cousus, et ont chargé les habits de significations sociales – une évolution qui a conduit à une culture du vêtement pas si lointaine de la nôtre, mais sans doute moins consommatrice...

✓ BIBLIOGRAPHIE

C. Michel et M.-L. Nosch (éd.), *Textile Terminologies in the Ancient Near East and Mediterranean [...]*, Oxbow Books, 2010.

J.-M. Durand, *La nomenclature des habits et des textiles dans les textes de Mari*, CNRS Éditions, 2009.

M. Frangipane et al., *Arslantepe, Malatya (Turkey) : Textiles, tools and imprints of fabrics from the 4th to the 2nd millennium BCE*, *Paléorient*, vol. 35, pp. 5-29, 2009.

P. Bordreuil, F. Briquel-Chatonnet et C. Michel (éd.), *Les débuts de l'histoire*, La Martinière, 2008.

C. Breniquet, *Essai sur le tissage en Mésopotamie*, De Boccard, 2008.

C. Michel, *Femmes et production textile à Assur au début du II^e millénaire avant J.-C.*, *Techniques & culture*, vol. 46, pp. 281-297, 2006.

Les galaxies perdues

James Geach

**D'après les dernières estimations,
l'Univers observable contient 200 milliards de galaxies.
Pourquoi si peu ?**

J'ai toujours été intrigué et fasciné par l'abondance des galaxies, saupoudrées telles des grains de sable sur le ciel nocturne. L'image optique la plus sensible jamais réalisée par l'homme, le champ ultraprofond de Hubble ou HUDF (pour Hubble Ultra Deep Field), capture quelque 10 000 galaxies dans une zone équivalente à un centième de l'étendue de la pleine lune. Rapportée à l'ensemble de la voûte céleste, une telle densité implique un total de 200 milliards de galaxies environ. Et cela ne prend en compte que les plus lumineuses ; leur nombre véritable est sans doute beaucoup plus grand.

Comment toutes ces galaxies ont-elles vu le jour ? C'est cette question qui est à l'origine de ma vocation d'astronome et qui reste le point central de mon activité de recherche. À en juger par leur nombre, la nature semble très douée pour produire des galaxies. Ce n'est pourtant pas le cas. Si l'on additionne toute la matière visible contenue dans les galaxies actuelles, on n'obtient qu'un dixième de la matière totale

issue du Big Bang. Où est le reste, et pourquoi ne s'est-il pas retrouvé dans les galaxies ? Il s'agit là de deux des plus grandes énigmes de l'astronomie aujourd'hui.

Il ne faut pas confondre la matière manquante avec la matière noire et l'énergie sombre. Ces dernières sont des substances de nature inconnue qui, à elles deux, représentent 96 pour cent du contenu total de l'Univers. Quant au nombre de galaxies, le problème réside du côté des quatre pour cent que nous sommes censés bien connaître. Cette portion de l'Univers est composée de matière normale, celle-là même qui constitue notre corps et tout ce qui nous entoure : essentiellement des baryons, la classe de particules qui inclut les protons et les neutrons.

Le fait que la plus grande part de cette matière ordinaire nous échappe est un mystère dans le mystère. Car non seulement la plus grande part de la matière de l'Univers est invisible et inexpliquée, mais même pour la petite portion de matière ordinaire, seule une fraction est détectée.





1. EN PROIE AUX AFFRES DE LA NAISSANCE,
une galaxie semblable à la nôtre attire
du gaz froid dense (*écoulements rouges*),
mais rejette aussi du gaz brûlant
(*écoulements bleus*) dans le milieu intergalactique.
À la fin du processus, seule une petite fraction
de la matière initiale se retrouve dans
la galaxie. L'auteur et ses collègues ont
obtenu cette image à l'aide d'un programme
de simulation cosmologique.

L'ESSENTIEL

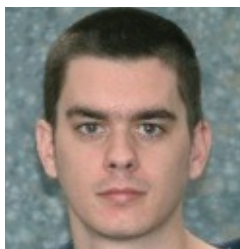
✓ Même si on laisse
de côté la matière noire,
la matière ordinaire
de l'Univers est déjà assez
mystérieuse. Pourquoi n'en
retrouve-t-on qu'une petite
fraction dans les galaxies ?

✓ Selon l'hypothèse
généralement admise
aujourd'hui, le gros de
la matière ordinaire serait
piégé dans des filaments
gazeux géants. Ce milieu
intergalactique « chaud
à très chaud », ou WHIM,
est difficile à détecter
directement.

✓ De plus, la formation
de galaxies est assez
inefficace. À mesure que
de la matière tombe sur
une galaxie, celle-ci en
rejette une bonne partie,
selon un ensemble de
mécanismes nommé
rétroaction galactique.

James E. Ostriker et Fred Cram

L'AUTEUR



James GEACH, né en Angleterre, est astronome observateur. Il est actuellement chercheur postdoctoral à l'Université McGill de Montréal, au Canada.

BIBLIOGRAPHIE

R. Davé *et al.*, The intergalactic medium over the last 10 billion years - 1. Ly-alpha absorption and physical conditions, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 408, n° 4, pp. 2051-2070, novembre 2010.

J. E. Geach *et al.*, The Chandra deep protocluster survey: Ly-alpha blobs are powered by heating, not cooling, *Astrophysical Journal*, vol. 700, n° 1, pp. 1-9, juillet 2009. arxiv.org/abs/0904.0452

Galaxies : fenêtres sur l'Univers, *Dossier Pour la Science*, n° 56, juillet-septembre 2007.

W. Tucker *et al.*, Le souffle des trous noirs, *Pour la Science*, n° 354, avril 2007.

E. Scannapieco *et al.*, Le milieu intergalactique, *Pour la Science*, n° 301, novembre 2002.

Site de l'auteur : www.physics.mcgill.ca/~jimgeach

Une autre façon de présenter les choses est de dire que le processus de formation des galaxies est inefficace – un peu comme si un fermier semait tout un champ et que seule une graine sur dix levait. Les astronomes essaient depuis des années d'expliquer pourquoi. La réponse qui émerge nous oblige à revoir l'idée que nous nous faisons de la formation des galaxies, et, plus radicalement encore, à revoir la nature même de ce qu'est une galaxie.

Depuis des décennies, les observateurs reconstituent une chronologie de l'histoire cosmique décrivant le contenu de l'Univers à différentes étapes de son évolution. Ce faisant, il est progressivement apparu qu'il y avait plus de baryons à l'aube de l'Univers que nous n'en détectons directement aujourd'hui.

On a perdu la moitié de l'Univers !

La quantité initiale de matière baryonique est en fait assez simple à estimer. Cette information est contenue dans le rayonnement fossile du Big Bang, le fond diffus cosmologique. Des expériences de pointe, comme WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) ou l'observatoire spatial *Planck*, ont détecté de petites fluctuations de température de ce rayonnement. La distribution de ces fluctuations reflète la densité en baryons de l'Univers à une époque où les galaxies n'étaient pas encore formées.

La mesure des abondances en hélium, deutérium et lithium apporte une vérification indépendante. Ces éléments ont été synthétisés dans les premières minutes de l'Univers en proportions qui dépendaient de la quantité totale de matière baryonique. Les deux techniques indiquent que la masse totale de matière baryonique devrait représenter quatre pour cent du contenu total de l'Univers actuel (17 pour cent de la masse totale).

Initialement, tous les baryons étaient sous forme d'un gaz chaud qui remplissait l'espace. Dans les régions où la densité de matière initiale était élevée, le gaz s'est accumulé sous l'effet de la gravité en nuages de plus en plus denses, qui ont été le point de départ de la formation des galaxies. Les astronomes ont détecté ce réservoir de gaz dans l'Univers jeune en analysant la lumière provenant de lointains quasars brillants. Peu importe pour nous à ce stade la nature des quasars ; il suffit de les considérer comme des pha-

res extrêmement brillants, qui éclairent par derrière le gaz primordial flottant dans l'espace intergalactique. Quand un rayon lumineux issu d'un quasar traverse un nuage d'hydrogène neutre et froid, le gaz absorbe une partie des photons. Le nuage n'absorbe que les photons ayant une certaine énergie, et cela se traduit par une lacune dans le spectre du quasar à une longueur d'onde bien précise : c'est ce que les astronomes appellent une raie d'absorption.

Un rayon lumineux provenant du quasar peut traverser une centaine de nuages de ce genre lors de son trajet à travers l'Univers, et chacun peut imprimer une raie d'absorption à une longueur d'onde légèrement différente, qui dépend de la distance entre le nuage et l'observateur. En faisant la somme de ces raies d'absorption, on peut calculer quelle proportion de baryons était contenue dans ces nuages. Le résultat suggère que jusqu'à cinq milliards d'années après le Big Bang, soit il y a environ neuf milliards d'années, on pouvait retrouver la trace du stock initial de l'Univers en baryons. La plus grande part de la matière baryonique flottait dans l'espace intergalactique et ne s'était pas encore effondrée pour former des galaxies lumineuses.

Au cours des neuf milliards d'années écoulées depuis, la plupart des galaxies que nous voyons aujourd'hui se sont formées à partir de ce vaste réservoir d'hydrogène primordial. À l'intérieur des galaxies, les baryons ont pris diverses formes : étoiles, vestiges stellaires, gaz neutre (atomique ou moléculaire), gaz ionisé, poussière, planètes, êtres vivants.

On peut estimer la masse des baryons des différentes formes en mesurant leurs émissions sur l'ensemble du spectre électromagnétique. Par exemple, la lumière visible et dans l'infrarouge proche révèle la masse des étoiles ; une raie d'émission radio particulière signale la quantité d'hydrogène atomique neutre ; la lumière infrarouge trahit la présence de poussière interstellaire.

Les astronomes ont recensé ainsi toutes les différentes phases de baryons dans toutes les galaxies observables, et c'est là qu'apparaît le désaccord : le total rend compte de seulement dix pour cent du stock initial de baryons présent dans l'Univers jeune. Difficile de croire qu'ils ont purement et simplement disparu : ils doivent traîner dans les vastes espaces intergalactiques. Mais pourquoi ne les voyons-nous pas ?

Les astronomes savent où trouver certains de ces baryons intergalactiques. Les amas, des essaims denses de galaxies, sont remplis de gaz ionisé diffus, ou plasma. Le champ gravitationnel intense de l'amas imprime aux ions une grande vitesse, conférant au plasma une température de plusieurs centaines de millions de degrés, suffisamment pour qu'il émette des rayons X. Des télescopes spatiaux tels que XMM-Newton et *Chandra* détectent de façon routinière des amas de galaxies au moyen de cette émission de rayons X.

Mais les amas sont rares, si bien que le gaz qu'ils contiennent ne rend compte que de quatre autres pour cent des baryons. Quand on additionne tous les baryons que nous voyons dans les galaxies, les amas et ailleurs dans l'espace intergalactique, cela ne représente toujours qu'une moitié du total environ, ce qui veut dire qu'il reste l'équivalent de 500 milliards de galaxies à trouver.

Pour équilibrer les comptes, Renyue Cen et Jeremiah Ostriker, de l'Université de Princeton, Romeel Davé de l'Université de l'Arizona, et leurs collaborateurs ont émis il y a une dizaine d'années l'hypothèse que les baryons sont présents, mais qu'ils ont évolué en une phase difficile à détecter. Les propriétés de ce composant insaisissable sont liées à la façon dont la matière cosmique de tous types, ordinaire comme exotique, s'organise en structures à grande échelle.

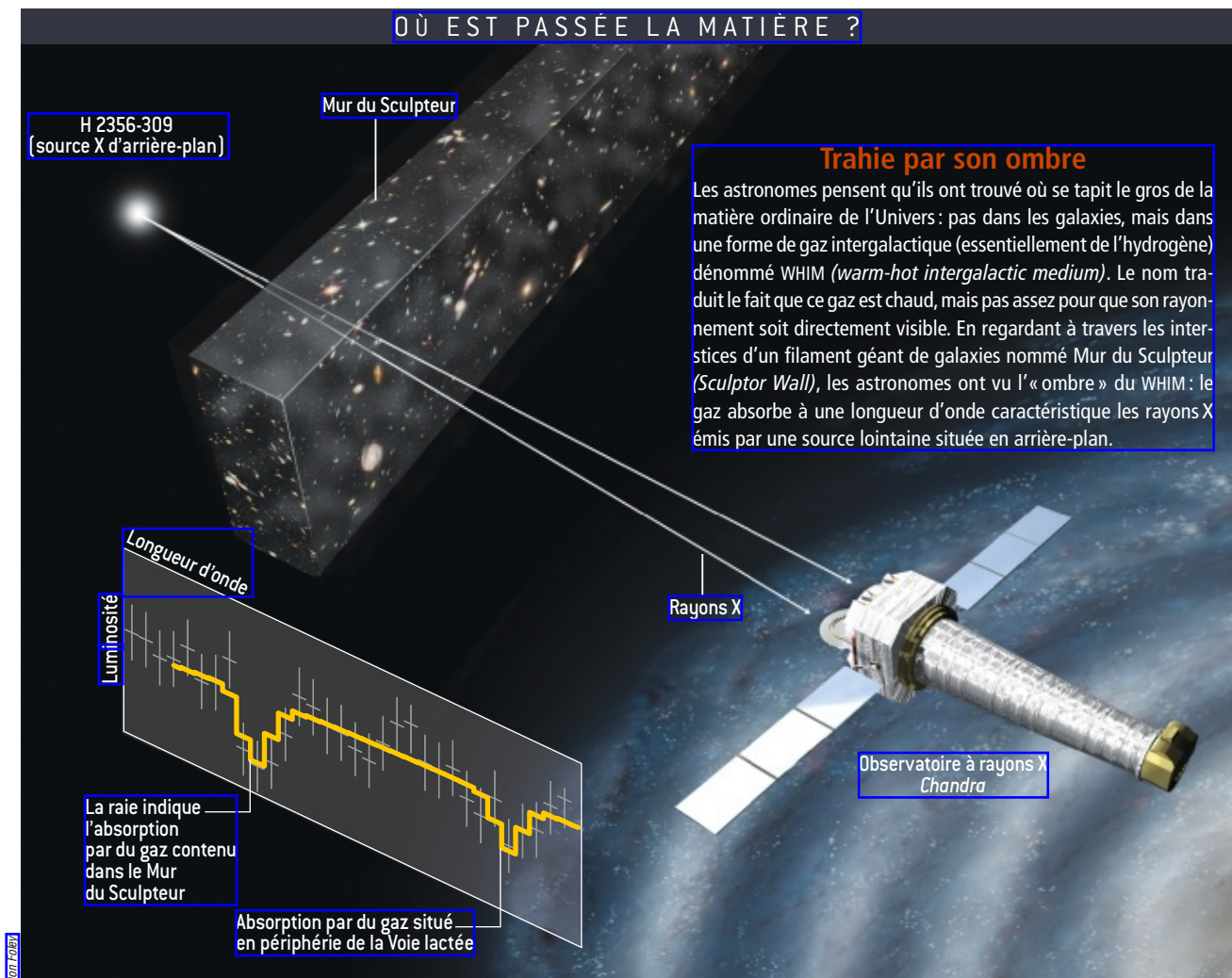
Les caprices du WHIM

Sous l'influence de la gravité, la matière noire s'est agencée en un vaste réseau de filaments qui s'enchevêtrent dans l'Univers. Les amas sont en fait les nœuds de grande densité de cette toile cosmique. En dehors des amas, la plupart des galaxies se rassemblent en groupes de plus faible densité ou s'alignent le long de filaments.

Le gaz intergalactique est attiré par la gravité vers les filaments, et les simulations suggèrent qu'en tombant, il est chauffé par des ondes de choc à des températures allant de 100 000 degrés à des dizaines de millions de degrés. Cela peut paraître brûlant, mais c'est tiède par rapport au gaz des amas. C'est suffisamment chaud pour qu'il reste ionisé, mais trop froid pour qu'il émette des rayons X.

R. Cen, J. Ostriker et R. Davé ont surnommé ce matériau WHIM (pour *warm-hot intergalactic medium*, ou milieu intergalactique chaud à très chaud – et *whim* signifie caprice). Si l'on arrivait à confirmer sa présence et son étendue, on parviendrait peut-être à mettre le doigt sur l'emplacement et l'état des baryons manquants.

La façon la plus prometteuse de détecter le WHIM est de rechercher des constituants à l'état de traces tels que l'oxygène ou l'azote ionisés, qui absorbent la lumière ultraviolette ou les rayons X à



des longueurs d'onde particulières. En fait, les astronomes peuvent appliquer la même technique des raies d'absorption que celle utilisée pour le recensement des nuages d'hydrogène froid dans l'Univers jeune; en d'autres termes, on peut rechercher les raies d'absorption dans le spectre des quasars qui rétroéclairent le WHIM.

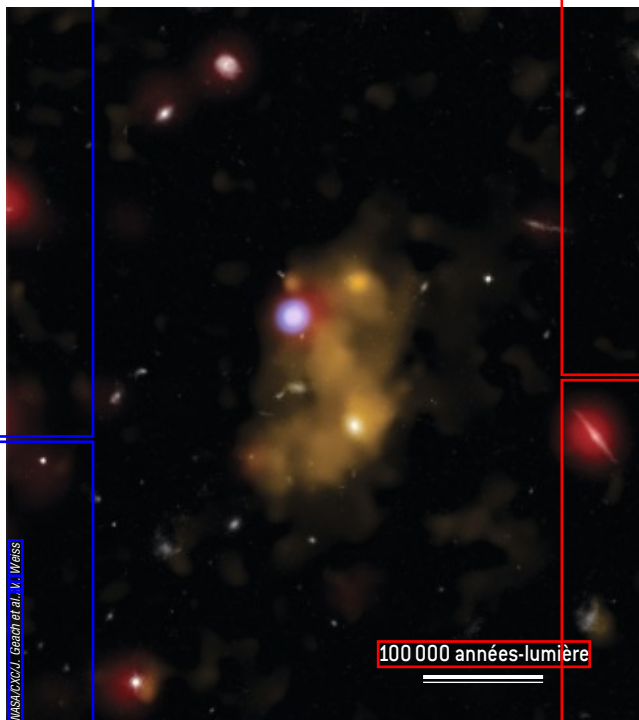
Nous avons déjà pu en entrapercevoir de très prometteuses. Dans l'ultraviolet, le télescope spatial *Hubble* et l'instrument FUSE (*Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer*, dont la mission est achevée) ont détecté une absorption par de l'oxygène fortement ionisé. Les premiers indices nous sont parvenus il y a un peu plus de dix ans, alors que le concept de WHIM était tout nouveau. Todd Tripp, maintenant à l'Université du Massachusetts à Amherst, et Blair Savage, de l'Université du Wisconsin à Madison, ont détecté une absorption par de l'oxygène ionisé dans le spectre du quasar PG 0953+415, dans l'ultraviolet lointain.

Davantage d'observations ont suivi dans la dernière décennie, rendues possibles par les améliorations des instruments, la plus récente étant l'installation du *Cosmic Origins Spectrograph* sur *Hubble*. Bien que les systèmes contenant de l'oxygène fortement ionisé semblent très répandus, cet ion ne signe que la partie relativement froide du WHIM. Pour traquer le gaz chaud, plus abondant, il faut rechercher une absorption par des espèces encore plus fortement ionisées.

Taotao Fang, de l'Université de Californie à Irvine, et ses collaborateurs ont utilisé les télescopes à rayons X *Chandra* et *XMM-Newton* pour jeter un coup d'œil dans les interstices du Mur du Sculpteur (*Sculptor Wall*, en anglais), une vaste chaîne de galaxies située dans l'Univers local: un parfait terrain de chasse au WHIM. Ils ont trouvé une absorption par de l'oxygène ionisé au point d'avoir perdu presque tous ses électrons. L'équipe a estimé que la densité globale des baryons dans cette composante du WHIM est en accord avec les simulations cosmologiques.

Bien qu'encourageantes, ces observations ne font que gratter la surface. Les

observations sont difficiles: le signal WHIM est faible, et nous travaillons en général aux limites techniques des instruments. Même quand nous détectons une absorption, nous devons faire de nombreuses hypothèses sur la composition du gaz pour appréhender les propriétés plus générales du WHIM. Plus important, la technique des raies d'absorption repose sur des quasars dont la présence à tel ou tel endroit est fortuite. Les quasars sont rares, les quasars brillants encore plus, ce qui fait de la chasse au WHIM une sorte de loterie. Néan-



2. CETTE MASSE INFORME d'hydrogène gazeux (en jaune) semble être le rebut de la formation d'une galaxie massive.

moins, nous pensons savoir où se trouvent les baryons manquants, et comment les détecter. De nombreux astronomes travaillent actuellement à cartographier sérieusement le WHIM.

Bataille pour des baryons

L'existence du WHIM explique en partie pourquoi la formation des galaxies est si inefficace. L'apparition d'une structure à grande échelle a rendu le gaz intergalactique trop ténu et chaud pour s'accumuler et constituer les réservoirs froids et denses nécessaires à la formation de galaxies. Mais à l'évidence, certains baryons ont réussi à former des galaxies, sinon nous ne serions pas là.

Un autre point est clair: la formation de galaxies était autrefois beaucoup plus efficace. Il y a environ huit milliards d'années, le taux de naissance des étoiles était 10 à 20 fois plus élevé qu'aujourd'hui. La plupart des galaxies que nous voyons aujourd'hui se sont formées à cette époque. Afin d'expliquer pourquoi la formation de galaxies s'est à tel point ralentie, les astronomes ont dû repenser nos modèles fondamentaux de la naissance des galaxies.

En principe, la recette pour faire une galaxie est très simple. Selon un modèle introduit dans les années 1990 par Simon White, de l'Institut Max Planck d'astrophysique de Garching, en Allemagne, et Carlos Frenk, de l'Université de Durham en Angleterre, les galaxies croissent au sein de grumeaux massifs de matière noire, nommés halos, dont l'attraction gravitationnelle aspire le gaz environnant comme de l'eau s'engouffrant dans une bonde.

Dans ce modèle, une partie du gaz est chauffée par des ondes de choc en traversant le halo, puis se refroidit par rayonnement, ce qui lui permet de s'agglomérer en un corps cohésif. Une fois dans la galaxie, le gaz peut continuer à se refroidir et s'effondrer en nuages d'hydrogène moléculaire. Sous l'effet de la contraction gravitationnelle, ces nuages finissent éventuellement par atteindre la densité nécessaire pour former des étoiles. Des galaxies plus grosses peuvent se former par fusion de petites galaxies.

S. White et C. Frenk étaient bien conscients que leur modèle n'était pas complet. Par exemple, tout le gaz qui pénètre dans les galaxies n'était pas chauffé par les ondes de choc jusqu'à atteindre de hautes températures. Mais le scénario de l'accrétion de gaz au sein des halos de matière noire donnait aux astronomes un cadre solide pour comprendre les principes de formation des galaxies. Ce domaine a été florissant ces 20 dernières années. Les théoriciens ont exploré plus avant la physique des écoulements de gaz et affiné le modèle initial. Des simulations numériques récentes, à haute résolution, de l'évolution thermodynamique du gaz suggèrent

qu'une partie du gaz entrant dans les disques galactiques en formation du jeune Univers s'écoule en flots relativement froids (10 000 à 100 000 degrés) et étroits (quelques milliers d'années-lumière de largeur). Ces flots froids semblent pénétrer le gaz chaud du halo et alimenter directement les galaxies.

Personne n'a encore vu ce processus à l'œuvre : la physique détaillée de l'accrétion de gaz vers les galaxies est complexe, et les différentes simulations prédisent des choses légèrement différentes. À ces réserves près, les astronomes admettent maintenant que toutes les galaxies se forment par accumulation de gaz primordial, que ce soit du gaz qui chauffe et se refroidit ou du gaz qui ne chauffe jamais.

Le problème avec ce modèle est que l'écoulement de gaz dans les galaxies ne peut pas se poursuivre avec la même vigueur. Les galaxies croîtraient jusqu'à devenir monstrueuses, et nous savons que cela n'arrive pas : les galaxies actuelles n'occupent qu'une gamme limitée de masses. Les premiers modèles semblaient reproduire assez fidèlement l'éventail observé des masses galactiques. Toutefois, avec le recul, on s'aperçoit qu'ils ne marchaient que parce que les astronomes utilisaient, pour la densité globale des baryons, une valeur sous-estimée d'un facteur deux par rapport à la valeur actuelle. Quand les nouvelles mesures ont révisé à la hausse la fraction des baryons, les théoriciens se sont aperçus que leurs modèles d'Univers prédisaient beaucoup plus de galaxies massives que l'on n'en observe.

Un autre problème est que les modèles prédisent une profusion de petits grumeaux de matière noire qui s'agglomèrent en corps de plus en plus gros. Les galaxies ne suivent pas cette tendance. Les astronomes ne voient pas autant de petites galaxies que les modèles n'en prédisent, et les galaxies les plus massives semblent s'être formées rapidement et efficacement, plutôt que par un assemblage progressif de petits morceaux.

Il manquait clairement aux modèles un ingrédient essentiel. Quelque chose doit réguler le refroidissement du gaz et la formation des étoiles dans les galaxies. Ce processus a rendu les petites galaxies peu efficaces pour former des étoiles, et a limité la taille des galaxies massives. Les théoriciens ont commencé à envisager toute une variété de processus physi-

ques supplémentaires susceptibles d'apporter cette régulation.

Désignés collectivement sous le nom de rétroaction galactique, ces processus peuvent contrer ou inverser l'effondrement gravitationnel du gaz sur les galaxies et ainsi limiter le nombre d'étoiles pouvant se former. Ils incluent les explosions de supernovae, le rayonnement ultraviolet et les éjecta d'étoiles, et l'extraordinaire énergie libérée pendant la croissance des trous noirs supermassifs tapis au cœur de toutes les galaxies massives. Dans les galaxies les plus massives, les trous noirs sont probablement le mécanisme de rétroaction dominant ; dans les systèmes de moindre masse, les supernovae et les vents stellaires sont plus importants.

Ce que tous ces processus ont en commun est de réinjecter de l'énergie dans le milieu environnant. Les galaxies peuvent ainsi étouffer le flot entrant de matière, empêcher le gaz qui s'est déjà accumulé de former des étoiles ou, dans les cas extrêmes, rééjecter des baryons dans l'espace intergalactique.

Recyclage de baryons

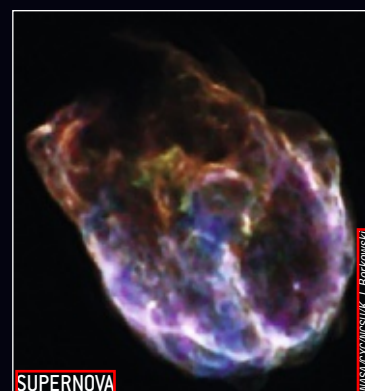
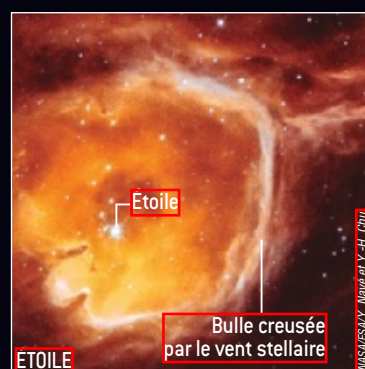
Les simulations qui prennent en compte les processus de rétroaction galactique reproduisent bien mieux la diversité observée des galaxies. Non seulement la rétroaction joue un rôle crucial pour expliquer l'évolution des galaxies, mais c'est un ensemble de processus qui peut aussi réalimenter, réchauffer et enrichir le WHIM. Par un processus continu de refroidissement et de chauffage, les baryons connaissent tout un cycle entre l'espace intergalactique, les étoiles et le gaz des galaxies. La croissance des galaxies est déterminée par un équilibre fragile qui a penché tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre tout au long de l'histoire cosmique. Avec la compréhension de cette bataille des baryons, nous voyons la formation des galaxies sous un jour nouveau.

L'étude du refroidissement du gaz et de la rétroaction galactique a été l'un des principaux centres d'intérêt des astrophysiciens durant la dernière décennie. Sans données empiriques, nous n'avons aucun moyen de tester les modèles. Un écoulement de matière froide entrant dans une galaxie se tahirait par la lueur diffuse émise par l'hydrogène qui se refroidit. La rétroaction se signifierait par l'émission infrarouge brillante émanant d'une intense

EXPULSION GALACTIQUE

Avalée et recrachée

Pourquoi ne trouve-t-on dans les galaxies qu'une faible fraction de la matière cosmique ? Non seulement l'essentiel de la matière aboutit dans le WHIM, mais les galaxies limitent aussi leur propre croissance. Le gaz intergalactique aspiré par leur gravité se condense en étoiles et en trous noirs. Ces objets réalimentent le milieu interstellaire et intergalactique, ce qui s'oppose à l'effondrement. Les processus de rétroaction incluent les vents soufflés par les étoiles, les explosions stellaires telles les supernovae et les jets expulsés par les trous noirs.

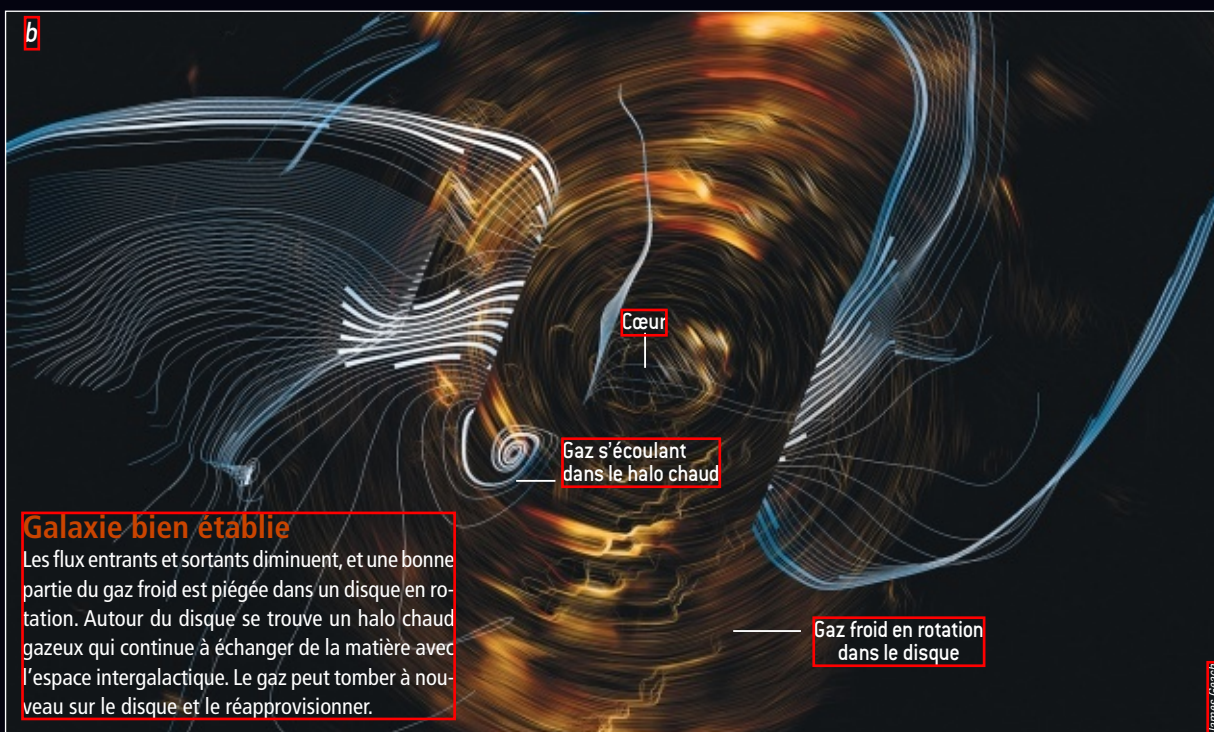
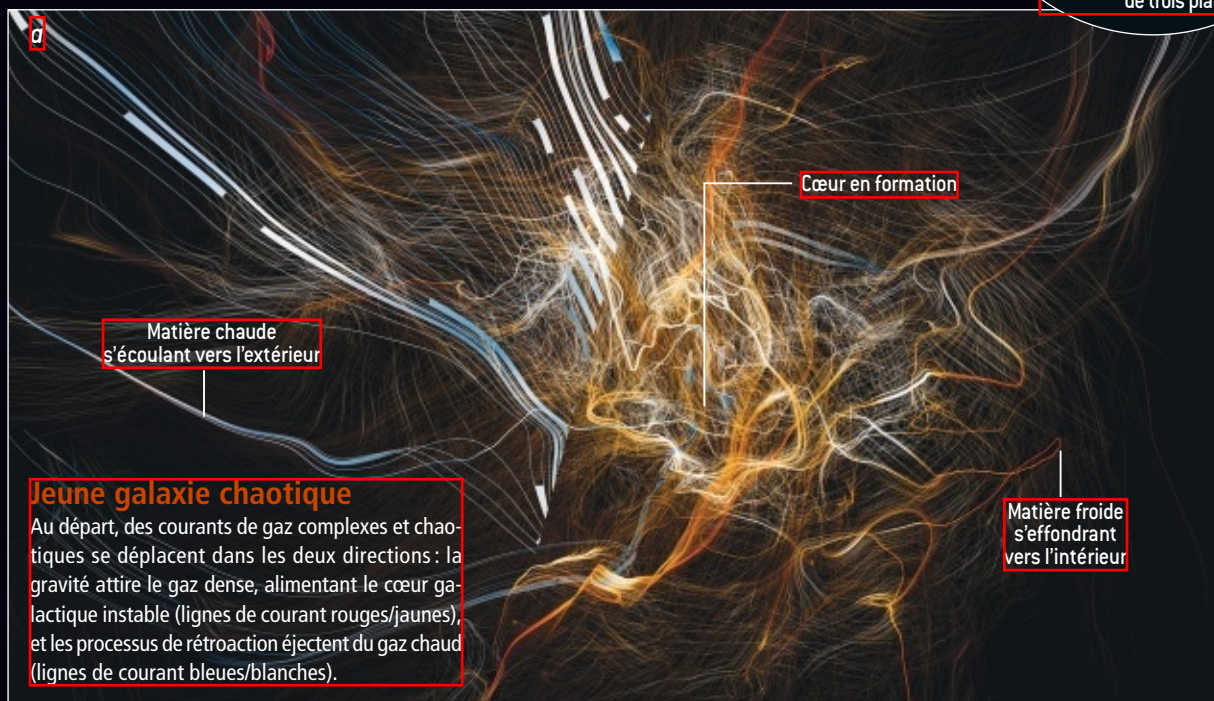


LES GALAXIES, DES SYSTÈMES DE RECYCLAGE

La valse turbulente

La plupart des gens se représentent les galaxies comme des structures imposantes : des boules géantes ou de majestueux tourbillons d'étoiles flottant dans le vide de l'espace profond. Mais les astronomes découvrent que les galaxies sont des systèmes fluides qui échangent activement de la matière avec leur envi-

ronnement. La matière ordinaire entre et sort des galaxies de façon cyclique, et à tout moment, c'est l'espace intergalactique qui en contient le plus. Cette simulation montre une galaxie semblable à notre Voie lactée telle qu'elle serait apparue il y a dix milliards d'années (a), et aujourd'hui (b).



formation d'étoiles et par l'émission X ou radio issue des environs d'un trou noir supermassif. Nous devons prendre ces deux processus en flagrant délit. Et c'est peut-être cela que nous avons fait récemment.

Il y a une dizaine d'années, Charles Steidel, de l'Institut de technologie de Californie, et ses collaborateurs ont découvert une nouvelle classe d'objets qui semble être une signature observationnelle du refroidissement : les nuages Lyman-alpha. Lyman- α désigne l'une des raies d'émission lumineuse de l'hydrogène.

Grosses masses nuageuses

Ces objets semblent être des masses nuageuses et lumineuses pouvant atteindre 300 000 années-lumière de diamètre, beaucoup plus que notre galaxie, la Voie lactée, ce qui les place parmi les plus gros objets lumineux de l'Univers jeune. Les astronomes en ont, depuis, découvert des quantités. Le rayonnement Lyman- α observé ressemble étonnamment à la signature radiative prédite théoriquement pour un écoulement de gaz froid en direction de jeunes galaxies.

Cependant, de nombreux autres processus astrophysiques pourraient être responsables de l'émission Lyman- α . Par exemple, la lumière ultraviolette ou le vent galactique pourraient « pomper de l'énergie » dans les nuages et les faire briller. À l'aide de *Chandra*, mes collègues et moi avons montré que de nombreux nuages Lyman- α contiennent des galaxies pourvues de trous noirs en phase de croissance active qui brillent fortement dans le domaine X. Cette activité s'accompagne souvent d'une intense formation d'étoiles, mise en évidence par l'émission infrarouge au milieu des couches de poussière qui obscurcissent les pouponnières stellaires. Nous avons calculé que l'énergie libérée par ces processus est plus que suffisante pour alimenter l'émission Lyman- α . Il se peut donc que la lueur des nuages résulte non pas d'un refroidissement, comme beaucoup le pensent, mais d'un chauffage.

Plutôt que de clarifier la situation, les nuages Lyman- α ont donc encore davantage brouillé les pistes. Nous devons maintenant concevoir et effectuer de nouvelles observations pour essayer de dévoiler ce qui se passe vraiment. Dans un cas comme dans l'autre, les nuages Lyman- α sont un

type d'objets susceptible de combler certaines lacunes dans notre compréhension de l'origine des galaxies.

L'observation que le milieu intergalactique entourant les galaxies jeunes et actives est inondé de rayonnement pourrait contribuer à résoudre un autre problème des modèles de formation des galaxies. D'après des simulations à très haute résolution de la matière noire, les galaxies telles que la Voie lactée devraient être accompagnées de milliers de galaxies naines tournant autour d'elles comme des abeilles autour d'une ruche. La Voie lactée a certes quelques compagnons nains, mais bien moins nombreux que ne le prédisent les simulations.

Une solution possible à ce problème est que les galaxies naines se sont effectivement formées dans l'Univers jeune, mais que leurs galaxies-parents les ont soufflées par leur rayonnement et leurs vents. Ce tir de barrage a dépouillé de baryons les galaxies naines ayant réussi à en accumuler, ce qui n'a laissé que des masses de matière noire dénudées, errant depuis à la périphérie des galaxies-parents.

Classiquement, nous nous représentons les galaxies lumineuses comme des univers-îles isolés et discrets, pour reprendre les termes du philosophe allemand Emmanuel Kant. D'une certaine manière, c'est vrai. Mais les îles galactiques lumineuses sont juste la partie visible d'un océan beaucoup plus vaste de matière baryonique qui nous échappe encore. Ce matériau imprègne tout l'Univers, distribué et mis en forme par une vaste architecture sous-jacente de matière noire, en constante évolution sous l'effet de la gravité.

Une nouvelle vision des galaxies

Tous ces baryons ont connu le même état initial : un milieu brûlant tout neuf qui a rapidement formé les premiers éléments, hydrogène et hélium, ainsi que de petites quantités de deutérium et de lithium. Ce que nous appelons des galaxies s'est formé à partir de cette matière première, concentrée par la gravité. Mais ces structures baryoniques ne sont pas figées. La matière se déplace le long de ces structures dans le cadre d'un vaste cycle en place depuis le Big Bang. Les influences concurrentes de la gravité et de la rétroaction galactique entraînent le refroidissement du gaz tombant sur les galaxies, puis son éjection hors des galaxies.

De récentes simulations numériques, réalisées par Rob Crain, de l'Université Swinburne de technologie de Melbourne, en Australie, Benjamin Oppenheimer, de l'Université de Leyde aux Pays-Bas, et leurs collaborateurs, suggèrent que jusqu'à la moitié des baryons aujourd'hui contenus dans les galaxies de l'Univers local sont passés au moins une fois dans le milieu intergalactique, et souvent de nombreuses fois. Les baryons dont notre corps est composé prennent part à ce cycle depuis 14 milliards d'années ; de la matière de notre ongle, par exemple, a pu être formée au sein d'étoiles d'autres galaxies, puis s'exiler durant des milliards d'années dans l'espace intergalactique avant de trouver asile dans notre Système solaire. Nous ne sommes qu'une phase éphémère, l'hôte d'un instant de cette rare substance que nous qualifions d'ordinaire.

Cette idée de cycle baryonique est à la base d'une nouvelle vision de l'évolution des galaxies, où celles-ci ne sont qu'une petite composante de l'évolution à grande échelle du milieu intergalactique. L'Univers baryonique est essentiellement gazeux, et non galactique. Le milieu intergalactique est le champ de bataille de diverses forces, et au milieu de ce maelström se forment des galaxies. Les galaxies ne constituent qu'une étape de traitement au cours d'un cycle qui fait constamment passer les baryons d'une phase à l'autre, et à tout instant, la plupart des baryons se trouvent en dehors des galaxies.

Nous avons, peut-être sentimentalement, une considération particulière pour les galaxies : la Voie lactée est notre habitat cosmique, une vaste demeure brillante et complexe plongée dans l'obscurité du cosmos. D'un point de vue anthropique, nous avons la chance d'exister à un moment où les baryons qui constituent la Terre sont sous une forme froide et stable. Cela ne sera pas toujours le cas. La mort du Soleil, dans cinq milliards d'années environ, fera brûler les planètes internes, s'évaporer les planètes externes, et redispersera progressivement les éléments lourds résultants dans le milieu interstellaire. À moins que l'humanité ne réussisse à se sortir de ce cycle en développant la capacité technique de s'échapper du Système solaire, les cendres de tout ce qui a jamais existé sur Terre sont vouées à être restituées, enrichies, au cosmos. Et c'est ainsi que le cycle se poursuivra. ■

Des hallucinogènes médicaments

Roland Griffiths et Charles Grob

Les hallucinogènes, telle la psilocybine extraite de champignons, modifient l'humeur. Ils sont à nouveau étudiés chez l'homme, car ils pourraient diminuer l'anxiété ou soulager la douleur.

Au printemps 2004, Sandy Lundahl, 50 ans, s'est présentée au Centre de recherche de biologie comportementale de la Faculté de médecine à l'Université Johns Hopkins, aux États-Unis. Elle était volontaire pour une série d'expériences sur les hallucinogènes, la première autorisée aux États-Unis depuis plus de 30 ans. Elle a rempli des questionnaires, discuté avec les deux expérimentateurs qui allaient rester près d'elle pendant les huit heures que devait durer l'expérience et s'est installée dans l'espace aménagé à cette fin. Elle a alors avalé deux comprimés et s'est allongée sur le divan, avec un masque sur les yeux et des écouteurs diffusant de la musique classique sélectionnée pour qu'elle se détende.

Les capsules contenaient une quantité importante de psilocybine, la principale substance active des champignons hallucinogènes (voir la figure 3). À l'instar du LSD et de la mescaline, la psilocybine produit des changements de l'humeur et de la perception, mais rarement de vraies hallucinations. À la fin de l'expérience, lorsque

L'ESSENTIEL

✓ Des centaines d'études sur les hallucinogènes ont été publiées dans les années 1950 et 1960. Ces molécules pourraient soulager des patients souffrant de divers troubles psychiatriques.

✓ Les expériences chez l'homme ont dû s'arrêter à cause de restrictions sur la recherche, imposées suite à l'usage illicite de ces drogues.

✓ Aujourd'hui, on teste si les hallucinogènes, notamment la psilocybine, peuvent soulager l'anxiété des patients cancéreux ou aider les personnes dépendantes à se libérer de leur addiction.

les effets de la psilocybine se sont dissipés, S. Lundahl, qui n'avait jamais consommé d'hallucinogènes au préalable, a rempli de nouveaux questionnaires. Elle a indiqué qu'elle avait vécu une expérience de type mystique, semblable à celle rapportée par des personnes en quête de spiritualité dans certaines cultures. Elle s'était alors sentie heureuse et avait perdu le sens du temps et de l'espace. Mais l'état modifié de conscience qu'elle avait vécu durant quelques heures allait changer durablement son humeur.

Des états modifiés de conscience

Un an plus tard, S. Lundahl précisa qu'elle pensait tous les jours à cette expérience et qu'elle était désormais de meilleure humeur et plus satisfaite de sa vie. S. Lundahl était l'une des 36 volontaires ayant participé à notre étude, commencée en 2001 et achevée en 2006, avec un suivi des participants pendant deux ans. La majeure partie de la communauté scientifique a alors salué la renaissance de ce



domaine de recherche, abandonné pendant des dizaines d'années.

À l'Université Johns Hopkins, les travaux sur la psilocybine s'effectuent selon deux axes. Le premier explore les effets psychologiques de cette molécule chez des volontaires sains. Le second évalue si les états modifiés de conscience provoqués par les hallucinogènes peuvent soulager diverses maladies mentales et comportementales, pour lesquelles les traitements actuels sont peu efficaces.

La substance utilisée dans ces études est la psilocybine, un hallucinogène dit classique. Comme les autres molécules de cette classe – la psilocine (le principe actif de la psilocybine), la mescaline, la diméthyltryptamine ou DMT et le LSD –, la psilocybine a une structure chimique proche d'un neurotransmetteur, la sérotonine (voir la figure 2). Cette molécule de communication entre neurones agit dans diverses régions cérébrales et régule plusieurs fonctions importantes, dont l'humeur, la mémoire, l'appétit, la sexualité et le sommeil. Ces hallucinogènes se lient aux récepteurs neuronaux de la sérotonine.

D'autres substances – également nommées hallucinogènes par le grand public et les études épidémiologiques – appartiennent à d'autres classes pharmacologiques que la psilocybine et exercent des effets différents. Ce sont par exemple la kétamine, la MDMA (nommée « ecstasy » en France), la salvinorine A et l'ibogaïne. Ces composés ont aussi un potentiel thérapeutique.

Des tests scientifiques avec des volontaires

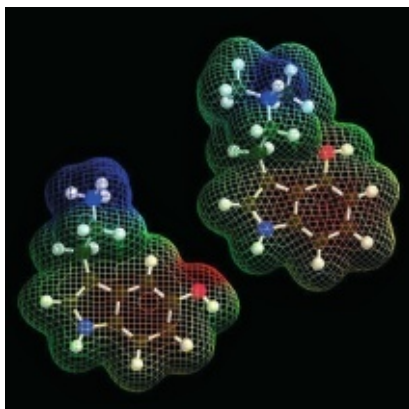
Les premières études concernant le rôle thérapeutique des hallucinogènes datent des années 1950 et ont impliqué des milliers de participants. Certaines suggéraient que les hallucinogènes pourraient traiter la dépendance aux drogues et soulager la détresse psychologique de malades condamnés.

Mais cette recherche s'est arrêtée au début des années 1970, quand l'utilisation des hallucinogènes, notamment le LSD, à des fins récréatives se développa. En 1963, Timothy Leary et Richard Alpert,

1. LES HALLUCINOGENES engendrent des états modifiés de conscience, qui peuvent changer durant plusieurs heures l'humeur et le comportement de la personne qui les a consommés.

de l'Université Harvard, ont été licenciés, car ils avaient été accusés de s'être livrés à des expériences non conventionnelles avec des hallucinogènes, et d'avoir fourni de la psilocybine à un étudiant. Ce domaine de recherche a pâti de cette affaire. Puis une loi promulguée aux États-Unis sur le contrôle des drogues en 1970 a placé les hallucinogènes classiques dans le tableau des stupéfiants ; de nouvelles limites ont été imposées à la recherche chez l'homme, les financements publics ont été interrompus et les chercheurs de ce domaine ont été marginalisés.

Plusieurs décennies se sont écoulées avant que des études scientifiques rigoureuses chez l'homme ne soient à



Heffter Research Institute, Santa Fe, USA

2. LES STRUCTURES MOLÉCULAIRES de la sérotonine (*en bas*) et de la psilocine (*en haut*), le principe actif de la psilocybine, sont proches. C'est aussi le cas du LSD, de la DMT et de la mescaline.

nouveau autorisées. Ce sont les états modifiés de conscience engendrés par les hallucinogènes qui intéressent les chercheurs, car ils provoquent des changements positifs, rapides et durables de l'humeur et du comportement – des modifications que des psychothérapies seraient plus longues à obtenir.

À l'Université Johns Hopkins, nous avons montré que de telles expériences peuvent être pratiquées au laboratoire chez de nombreuses personnes. Elles permettent, pour la première fois, des analyses scientifiques rigoureuses et prospectives, et les volontaires sont suivis avant et après la consommation de l'hallucinogène. Les chercheurs peuvent ainsi observer

La recherche psychédélique en France et en Europe

L'Association française *Arthemoc*, qui a organisé à Paris plusieurs colloques internationaux en partie consacrés à la recherche contemporaine sur les hallucinogènes, ou psychédéliques, a remis en 2009 un rapport de prospective destiné à l'Agence nationale de la recherche. Pourtant, en France, il n'existe aujourd'hui aucun programme scientifique, malgré des études pionnières réalisées sur la psilocybine.

Le mycologue Roger Heim (1900-1979), alors directeur du Muséum national d'histoire naturelle de Paris, coordonna en 1958 une première étude multidisciplinaire intitulée *Les champignons hallucinogènes du Mexique*. Des spécimens mexicains cultivés au Muséum ont été envoyés au chimiste suisse Albert Hofmann, qui isola et synthétisa la molécule de psilocybine en un temps record. L'intérêt de Heim dépassait le cadre de la mycologie : il entra en contact avec le psychiatre et neurologue français Jean Delay (1907-1987) de l'Hôpital Saint-Anne, qui coordonna un programme d'expérimentations thérapeutiques avec la psilocybine. En 1961, lors d'une conférence de l'Association médico-psychologique royale de Londres, ayant pour thème *Les drogues hallucinogènes et leur usage thérapeutique*, des experts internationaux de diverses disciplines présentaient des résultats encourageants, suggérant les effets bénéfiques des psyché-

déliques dans diverses pathologies. En 1967, l'Assemblée mondiale de la santé adopta une résolution dont l'application mit un frein à la recherche psychédélique chez l'homme. En France, la plupart des psychédéliques sont classés comme stupéfiants et sont considérés comme des substances ayant un fort potentiel d'abus, des effets nocifs importants et n'ayant pas de valeur thérapeutique notable.

Bénéfiques pour la santé ?

Pourtant, les études récentes montrent diverses applications thérapeutiques et une relative innocuité quand leur administration est encadrée. Dans certains cas, ces substances permettraient de traiter des maladies invalidantes. Par exemple, des scientifiques de Harvard ont fait état de l'efficacité de la psilocybine et du LSD pour traiter les algies vasculaires de la face (des céphalées extrêmement violentes et douloureuses) chez certains patients ne répondant à aucun traitement classique. Ils testent actuellement le 2-bromo LSD, qui a une structure semblable au LSD, mais qui n'est pas psychoactif.

Ainsi, chez l'homme, la recherche sur les psychédéliques a lieu en majorité aux États-Unis et est surtout financée par deux associations : l'Institut Heffter et la Maps (*Multi-disciplinary association for psychedelic studies*). En Europe, il existe peu de fonds et d'intérêt pour ces tra-

vaux, et les rares études menées dans ce domaine sont aussi financées par ces associations américaines.

La fondation *Beckley*, située en Angleterre, est une exception. Elle finance entre autres une étude du Département de neuropsychopharmacologie à l'*Imperial College* de Londres : grâce à l'imagerie cérébrale par résonance magnétique fonctionnelle, les chercheurs observent les effets de la psilocybine. Leurs résultats préliminaires montrent une modulation du cortex cingulaire ventromédian, une structure impliquée dans la dépression qui réprimerait des données inconscientes. Une étude en cours examine l'effet possible de la psilocybine sur la dépression et les souvenirs refoulés. À Barcelone, l'équipe de Jordi Riba étudie depuis une dizaine d'années les effets de l'ayahuasca, une décoction psychoactive amazonienne. Elle a montré que cette substance n'est pas toxique et qu'elle interagit avec les systèmes neuro-naux responsables de l'intéroception (la sensibilité liée aux stimulus internes) et des émotions.

En Allemagne, Torsten Passie participe à l'étude de Harvard sur le 2-bromo LSD. À l'Université de Cologne, l'équipe d'Euphrosyne Gouzoulis-Mayfrank travaille sur la mescaline, la psilocybine et la DMT ; elle étudie notamment leurs effets neurobiologiques et cognitifs. À l'Hôpital universitaire de Zurich, le groupe de Franz Vollenweider effectue de-

puis plus de dix ans un travail pionnier dans la neuropsychopharmacologie de la MDMA, de la psilocybine, de la DMT et de la kétamine. Il a montré que les psychédéliques modulent les réseaux neuronaux impliqués dans les troubles de l'humeur et de l'affect ; ils pourraient en diminuer les symptômes. Quant au psychiatre suisse Peter Gasser, il mène une étude clinique sur la psychothérapie associée au LSD pour soulager l'anxiété de patients en phase terminale de cancer, la première avec le LSD depuis 35 ans. Enfin, en Suisse, Peter Oehen réalise en ce moment un essai thérapeutique avec de la MDMA pour traiter le trouble du stress post-traumatique. L'armée américaine, consciente de l'enjeu, vient de donner le feu vert à des essais thérapeutiques sur des vétérans souffrant de stress post-traumatique lié à la guerre.

Les usages thérapeutiques supervisés de ces substances permettront-ils de lutter contre des problèmes de santé publique majeurs, tels que la dépression et la dépendance ? Les résultats actuels sont prometteurs, mais des études complémentaires à grande échelle seraient nécessaires. Les chercheurs, les méthodes et les équipements existent, mais le soutien institutionnel et financier fait défaut.

Alexandre Lehmann

est postdoctorant à l'Université de Montréal et cofondateur de l'Association *Arthemoc*

les effets psychologiques et comportementaux des états modifiés de conscience.

Nous avons utilisé des questionnaires conçus au départ pour évaluer les états modifiés de conscience se produisant avec mise en condition psychologique, mais sans drogue, et nous avons examiné les participants 2 mois et 14 mois après l'administration de l'hallucinogène. Nous avons constaté que les sujets avaient plus confiance en eux, étaient plus satisfaits de leur vie, moins nerveux, toléraient davantage la frustration, et se sentaient globalement mieux. L'évaluation de leur comportement par des amis, des membres de la famille et des collègues de travail, qui ignoraient l'expérience avec l'hallucinogène, corroborait les auto-évaluations des participants.

Il y a 40 ans, quand la recherche sur les thérapies par les hallucinogènes a été interrompue, plusieurs pistes restaient à explorer : peuvent-ils traiter l'alcoolisme et la dépendance à d'autres drogues, l'anxiété associée au cancer, les troubles obsessionnels compulsifs, le trouble du stress post-traumatique, les maladies psychosomatiques, les troubles graves de la personnalité et l'autisme ? À l'époque, la plupart des études restaient anecdotiques et comportaient peu de données. Même les meilleures expériences ne présentaient pas les conditions de contrôle et la méthodologie rigoureuses qui caractérisent aujourd'hui la recherche en psychopharmacologie clinique.

Les patients atteints de cancer souffrent souvent d'une anxiété importante et de dépression, des symptômes que ni les antidépresseurs ni les anxiolytiques ne soulagent vraiment. Dans les années 1960 et au début des années 1970, plus de 200 patients ont reçu des hallucinogènes classiques dans plusieurs essais cliniques.

Pour affronter la mort

En 1964, Eric Kast, de la Faculté de médecine de Chicago, qui administrait du LSD à des patients au stade terminal souffrant d'importantes douleurs, rapporta que les sujets développaient une indifférence vis-à-vis de la gravité de leur situation et parlaient de leur mort imminente sans manifester les émotions qui accompagnent en général cette étape de la maladie.

Plus tard, Stanislav Grof, William Richards et leurs collègues, à l'Hôpital Spring Grove près de Baltimore, ont testé

le LSD et un autre hallucinogène classique, la DPT (la dipropyltryptamine). Avec cet essai clinique, ils ont conclu à une diminution de la dépression, de l'anxiété et de la peur de la mort, et les patients ayant vécu une expérience de type mystique présentaient des améliorations importantes de leur bien-être psychique.

En septembre 2010, des équipes du Centre médical Harbor-UCLA en Californie ont évalué comment des traitements avec de la psilocybine diminuaient l'anxiété chez 12 patients atteints d'un cancer au stade terminal. Bien que le nombre de participants ait été trop faible pour tirer des conclusions, les résultats étaient encourageants : les patients étaient moins anxieux et de meilleure humeur, même plusieurs mois après la prise de psilocybine. Et ils avaient moins peur de mourir.

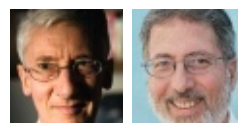
En collaboration avec l'Université de New York, nous poursuivons aujourd'hui ces travaux avec des patients souffrant de cancer, en utilisant des quantités plus importantes de psilocybine, susceptibles de provoquer des états modifiés de conscience – qui, selon les études antérieures, prolongeraient les effets thérapeutiques. En Suisse, une expérience pilote semblable est en cours, avec le LSD au lieu de la psilocybine.

Des hallucinogènes pour se sevrer

Les alcooliques, les fumeurs et les personnes dépendantes d'autres drogues rapportent parfois qu'ils ont vaincu leur addiction après une expérience de type mystique spontanée, les ayant profondément touchés. Les premières études concernant les effets cliniques des hallucinogènes avaient reconnu le pouvoir thérapeutique potentiel des états modifiés de conscience. Plus de 1 300 patients avaient participé à ces expériences. Dans certains cas, on administrait de fortes concentrations d'hallucinogènes à des patients peu préparés ne bénéficiant que d'un faible soutien psychologique ; les résultats étaient alors faibles. Les chercheurs qui évaluaient l'importance de la préparation psychologique et du lieu de l'expérience, et qui accompagnaient mieux les patients, avaient de meilleurs résultats. À nouveau, ces études étaient encourageantes, mais non concluantes.

La recherche actuelle sur les hallucinogènes devrait déterminer si ces substances

LES AUTEURS



Roland GRIFFITHS est professeur de biologie comportementale et de neurosciences dans les Départements de psychiatrie et de neurosciences de l'École de médecine de l'Université Johns Hopkins aux États-Unis.

Charles GROB est professeur de psychiatrie et de pédiatrie à l'École de médecine David Geffen de l'Université de Californie à Los Angeles (UCLA), et il dirige la Division de psychiatrie de l'enfant et de l'adolescent au Centre médical Harbor-UCLA.

✓ SUR LE WEB

Le projet cancer et psilocybine à l'Université Johns Hopkins : www.cancer-insight.org

Le site internet d'Arthemoc : <http://hallucinations.risc.cnrs.fr>

✓ BIBLIOGRAPHIE

J. L. Moreno *et al.*, Metabotropic glutamate mGlu2 receptor is necessary for the pharmacological and behavioral effects induced by hallucinogenic 5-HT2A receptor agonists, *Neuroscience Letters*, vol. 493, pp. 76-79, avril 2011.

C. S. Grob *et al.*, Pilot study of psilocybin treatment for anxiety in patients with advanced-stage cancer, *Archives of General Psychiatry*, vol. 68, pp. 71-78, janvier 2011.

S. Baud et C. Ghasarian, *Des plantes psychotropes*, Éditions Imago, Paris, 2010.

Dossier : Le cerveau halluciné, *Cerveau & Psycho*, n° 31, janvier-février 2009.

S. Baud et N. Midol, *La conscience dans tous les états*, Éditions Elsevier-Masson, Paris, 2009.

R. R. Griffiths *et al.*, Personal meaning and spiritual significance, *Psychopharmacology*, vol. 187, pp. 268-283, août 2006.

Les hallucinogènes dans le cerveau

Les recherches sur le mode d'action des hallucinogènes diffèrent selon qu'elles portent ou non sur des êtres humains. Comme le rappellent R. Griffiths et C. Grob, la recherche chez l'homme s'est longtemps arrêtée. Elle a repris au début des années 1990, afin de relier les manifestations cognitives et les effets neurobiologiques des psychédéliques. Depuis plus de dix ans, trois équipes sont actives en Europe : le centre de recherche Heffter de Franz Vollenweider à Zurich (psilocybine), l'équipe d'Euphrosyne Gouzoulis-Mayfrank à l'Université de Cologne (mescaline, psilocybine, DMT) et celle de Jordi Riba à l'Hôpital Santa Creu i Sant Pau de Barcelone (ayahuasca).

Les techniques d'imagerie cérébrale et d'électroencéphalographie utilisées par ces chercheurs ont produit des résultats convergents quant au mode d'action des hallucinogènes : une activation du cortex préfrontal (impliqué dans l'intégration cognitive, affective et sensorielle et le contrôle de l'action), du cortex cingulaire antérieur (qui participe à la détection et à l'évaluation des erreurs, à la résolution de conflits sensoriels et à la conscience émotionnelle) et du cortex insulaire (qui lie les sensations corporelles internes aux émotions et évalue la douleur). Des diminutions d'activité dans le cortex occipital (de la perception visuelle) et les voies visuelles sont aussi enregistrées.

De son côté, la recherche fondamentale (*in vitro* ou sur des animaux) a progressé sans interruption depuis 1953, après que le pharmacologue anglais John Gaddum (1900-1965) a montré que la molécule de LSD ressemble à celle de la sérotonine, et qu'elles interfèrent dans l'organisme. Dès lors, non seulement les chercheurs tentent de comprendre le mode d'action des psychédéliques,

mais ils les utilisent aussi quand ils étudient la sérotonine, l'interêt pour ce neuromédiateur n'ayant cessé de croître. Alors, comment agissent les hallucinogènes dans le cerveau ?

Chez l'animal, les chercheurs utilisent deux types de dispositifs pour identifier les effets des psychédéliques. Lors de tests de discrimination de drogues, les réactions comportementales des rongeurs diffèrent selon la substance consommée. Ce dispositif permet de montrer dès le début des années 1980 que l'action commune et principale des psychédéliques est d'activer les récepteurs 2A de la sérotonine (on dit que ce sont des agonistes des récepteurs 2A de la sérotonine, ou plus brièvement des agonistes 2A). Ce résultat a été confirmé chez l'homme en 1998 : un antagoniste des récepteurs 2A bloque l'essentiel des effets de la psilocybine.

La tête qui tourne

Un autre type de dispositif expérimental mesure des « indices comportementaux » témoignant de l'activation des récepteurs 2A par les psychédéliques. Par exemple, les souris réagissent à la drogue en secouant rapidement la tête. Cet indice est peu spécifique, car les mouvements de la tête sont aussi observés après administration d'un précurseur de la sérotonine, mais il est considéré comme fiable. Il a été utilisé récemment pour tenter de résoudre une énigme ancienne : si tous les psychédéliques classiques sont des agonistes 2A, pourquoi tous les agonistes 2A ne sont pas des psychédéliques ?

En général, un récepteur transmembranaire, tel le récepteur 2A, est lié à une cascade spécifique d'événements intracellulaires, la voie de signalisation. Quand un ligand provoque une réaction équivalente

à celle de la sérotonine, le ligand est un agoniste. Si la réaction est moindre, c'est un agoniste partiel. Quand il bloque la signalisation, on a affaire à un antagoniste. Et si l'activité spontanée est diminuée, c'est un agoniste inverse.

Multiple effets

Or l'hypothèse dégagée des travaux récents est que les récepteurs 2A peuvent adopter plusieurs configurations dont les fonctions sont distinctes ; et chacune d'elles implique une voie de signalisation donnée. En outre, chaque ligand engendre une configuration particulière du récepteur. Ainsi, le groupe de Stuart Sealton et de Javier González-Maeso, à l'École de médecine de Mount Sinai à New York, a montré avec des souris transgéniques que le LSD stabilise une configuration fonctionnelle des récepteurs 2A différente de celle engendrée par le lisuride, un analogue du LSD qui active les récepteurs 2A sans effets notables sur la conscience des êtres humains.

Complicant encore la situation, ils ont aussi mis en évidence sur des neurones corticaux une association fonctionnelle étroite des récepteurs 2A avec les récepteurs mGlu2 du glutamate, le neurotransmetteur exciteur le plus répandu dans le cerveau. Dans ce complexe 2A/mGlu2, les récepteurs interagissent, chacun modifiant les fonctions de l'autre. Ainsi, la suppression du récepteur mGlu2 chez des souris transgéniques abolit les effets du LSD sur la voie de signalisation du récepteur 2A et sur l'indice comportemental associé (disparition des secousses de la tête).

Frédéric Bois-Mariage

est chercheur en neuropharmacologie, psychologie clinique et ethnologie

peuvent effectivement aider les patients à surmonter leur dépendance. Par exemple, nous avons commencé une étude pilote sur le sevrage tabagique ; les participants reçoivent de la psilocybine en complément d'une thérapie cognitivo-comportementale, qui enseigne aux patients comment changer leurs pensées et leurs comportements pour arrêter de fumer et rester abstinents.

En outre, certaines équipes testent si la psilocybine peut soulager les symptômes des troubles obsessionnels compulsifs. D'autres substances, ayant des mécanismes d'action différents, présentent aussi un potentiel thérapeutique. Par exemple, la kétamine, normalement utilisée comme anesthésique, traiterait, quand elle est utilisée en faibles doses, la dépression plus rapidement que des antidépresseurs classiques, tel le Prozac. Des chercheurs en Caroline du Sud ont aussi montré que la MDMA soigne efficacement le trouble du stress post-traumatique chez des patients pour lesquels les thérapies habituelles avaient échoué. D'autres essais cliniques avec la MDMA sont en cours en Suisse et en Israël.

Des expériences bien encadrées

Mais ces thérapies avec les hallucinogènes ne seront acceptées que si l'on tire les leçons des « psychédéliques » des années 1960. Parfois, les hallucinogènes provoquent anxiété, paranoïa ou panique. Dans des contextes non contrôlés, cela peut conduire à des accidents ou au suicide. Dans nos études, même après une sélection rigoureuse des volontaires et au moins huit heures de préparation avec un psychologue clinique, environ un tiers des patients ont vécu des épisodes d'angoisse, et environ un cinquième s'est senti paranoïaque pendant l'expérience. Mais au centre de recherche, grâce à la présence permanente de personnes spécifiquement entraînées pour réaliser ce type d'expériences, aucun des participants n'a eu d'effets indésirables durables.

Les autres risques liés à la consommation d'hallucinogènes sont une psychose prolongée (des troubles de la personnalité), une détresse psychologique (une diminution du bien-être) ou des troubles de la vision ou des autres sens, qui peuvent durer quelques jours, voire davantage. Ces effets sont rares, notamment chez

des volontaires sélectionnés avec soin et préparés psychologiquement.

Si les hallucinogènes sont parfois consommés comme stupéfiants, ils ne sont pas considérés comme des drogues « addictives », car ils ne déclenchent pas la consommation compulsive de drogues ni de syndrome de manque. Toutefois, nous avons publié des directives de sécurité pour la réalisation d'études scientifiques impliquant de grandes quantités d'hallucinogènes. Étant donné les capacités des chercheurs à prendre en charge les risques associés aux drogues, nous pensons que les études avec les hallucinogènes doivent continuer, car ces substances peuvent améliorer la vie de patients dépendants à une substance ou atteints de cancer. Et si les hallucinogènes se révèlent efficaces dans ces cas, il faudrait voir s'ils peuvent être associés à d'autres thérapies, par exemple pour soulager les troubles alimentaires, les comportements sexuels à risques et divers comportements inadaptés.



3. **LES CHAMPIGNONS** hallucinogènes appartiennent à l'ordre des *Agaricales* (comme le champignon de Paris). Ces « bonnets de lutin » (*Psilocybe semilanceata*) sont la seule espèce du genre *Psilocybe* présente en Europe. Ils contiennent une molécule psychoactive, la psilocybine (qui représente 0,4 pour cent de leur poids).

© Shutterstock/alon

En outre, peut-être pourrait-on développer des protocoles non pharmacologiques ayant des effets plus rapides et plus efficaces que les pratiques spirituelles traditionnelles, tels la méditation et le jeûne, qui engendrent des états de conscience modifiés et des changements comportementaux. C'est d'ailleurs ce genre d'expérience qui avait convaincu Bill Wilson, de l'Hôpital Towns à New York, d'arrêter de boire et de fonder les Alcooliques anonymes dans les années 1930.

Si des études complémentaires à grande échelle sont nécessaires pour déterminer les effets thérapeutiques des hallucinogènes, les résultats récents sont prometteurs. Mais une question reste en suspens : quels sont les mécanismes d'action des hallucinogènes ? Les techniques d'imagerie cérébrale et de pharmacologie devraient y répondre (voir l'encadré page ci-contre). Voir les régions cérébrales impliquées dans les émotions intenses et les pensées des personnes sous l'influence des hallucinogènes permettrait de mieux comprendre la physiologie des états modifiés de conscience.

Et tout s'éclaire

france culture

La marche des sciences
14h/15h jeudi

avec **Aurélie Luneau**
en partenariat avec le magazine Pour la Science

franceculture.com

DREAM ON - Radio France / Christophe Abramowitz



L'ESSENTIEL

✓ Les CubeSats sont des satellites standardisés de un kilogramme et dix centimètres de côté, lancés en même temps que d'autres missions.

✓ Moins coûteux et plus rapides à développer que les satellites classiques, ils offrent aux universités, aux États ou même aux amateurs la possibilité de lancer une mission spatiale.

✓ Les études en cours et envisagées sont nombreuses, de la physique atmosphérique aux expériences en microgravité.

Montana State University, Space Science and Engineering Laboratory

Depuis que *Sputnik* a inauguré l'ère des satellites artificiels, il y a plus de 50 ans, les grandes institutions ont dominé le ciel. La plupart des milliers de satellites en orbite autour de la Terre sont le fruit d'énormes projets financés par des gouvernements ou des corporations. Pendant des décennies, chaque génération de satellites a été plus sophistiquée et plus chère que la précédente, nécessitant une infrastructure coûteuse d'installations de lancement, de stations de surveillance, de spécialistes de mission et de centres de recherches.

Ces dernières années, cependant, les progrès de l'électronique, de l'énergie solaire et d'autres techniques ont permis de réduire drastiquement la taille des satellites. Un nouveau type de satellite, nommé CubeSat, est ainsi développé dans diverses régions du globe : petit (c'est un cube de dix centimètres de côté), compact, il simplifie et standardise la conception de

petits engins spatiaux, et ramène les coûts de développement, de lancement et d'exploitation d'un satellite à moins de 70 000 euros, soit une infime fraction du budget d'une mission de la NASA ou de l'Agence spatiale européenne.

L'idée est de donner aux développeurs de satellites des caractéristiques standards de taille et de poids, afin que plusieurs CubeSats (mis au point chacun par un groupe différent de scientifiques, d'étudiants, d'ingénieurs) puissent être combinés en une seule charge utile de fusée – un unique bloc transporté. Greffée sur une autre mission plus coûteuse ayant un peu de place à partager, la charge de CubeSats est ensuite mise en orbite à moindre frais, le coût du lancement de la fusée étant réparti entre les différents participants. Les normes de conception du CubeSat permettent en outre aux participants de partager leur savoir-faire et d'acheter des composants du commerce.

À chacun son SATELLITE

Alex Soojung-Kim Pang et Bob Twiggs

Grâce à de minuscules satellites standardisés, les expériences spatiales sont à la portée des équipes de recherche les plus petites.

Plus d'une vingtaine de CubeSats ont été lancés avec succès. Conçus par des scientifiques des États-Unis, d'Asie, d'Europe ou d'Amérique du Sud, ils ont effectué diverses missions allant de la recherche biomédicale en microgravité aux études de la haute atmosphère. Leur popularité est croissante : de faible coût, de développement rapide et portés par une communauté internationale d'utilisateurs passionnés, ils représentent un outil pédagogique idéal pour les universités. Des équipes universitaires – souvent constituées principalement d'étudiants et de doctorants – ont vu le jour dans le monde entier pour s'y consacrer. Les CubeSats offrent aussi à des petits pays, des jeunes pousses et même des équipes de lycée, la possibilité de développer leurs propres programmes spatiaux. Les coûts de lancement pourraient bientôt se réduire à 7000 euros, assez bas pour que les amateurs soient intéressés. Les CubeSats sont en passe de produire, dans le domaine

spatial, le même effet que l'*Apple II* en informatique il y a 30 ans : une révolution due à la démocratisation d'une technologie connue, mais jusqu'alors inaccessible.

Des satellites de un kilogramme

De petits satellites de quelques kilogrammes existent depuis les débuts de l'ère spatiale ; *Sputnik 1* lui-même pesait à peine plus de 80 kilogrammes. Mais à mesure que les fusées ont gagné en puissance, les satellites sont devenus plus gros et complexes, à tel point qu'aujourd'hui, un satellite de communications ou de recherche pèse plusieurs tonnes.

Parallèlement, les « microsatellites » (d'un poids compris entre 10 et 100 kilogrammes) ont été marginalisés, mais sans jamais disparaître. Par exemple, des spécialistes de l'atmosphère en ont envoyé explorer la thermosphère, la couche atmos-

phérique qui s'étend de 80 kilomètres au-dessus de la surface terrestre à 600 kilomètres environ ; et depuis le début des années 1960, nombre de satellites de communications OSCAR (*Orbiting Satellite Carrying Amateur Radio*, satellite orbital radioamateur) ont été conçus par des clubs d'amateurs issus d'universités, d'écoles d'ingénieurs ou de l'industrie spatiale pour faciliter la communication des radioamateurs.

L'intérêt pour les petits satellites a commencé à croître dans les années 1980, grâce

1. VUE D'ARTISTE DU CUBESAT *Explorer-1 [Prime]* de l'Université de l'État du Montana. Embarqué le 4 mars dernier sur la fusée *Taurus XL* de la NASA, ce petit satellite devait étudier la ceinture de Van Allen, une zone riche en particules de haute énergie qui entoure la Terre. Mais à cause d'un incident technique, la fusée n'a pu atteindre une vitesse suffisante pour placer le satellite en orbite. À plus de 550 kilomètres d'altitude, il est retombé sans avoir pu transmettre de signal. Une copie du satellite devrait être lancée dès octobre prochain.

LES AUTEURS



Alex SOOJUNG-KIM PANG, docteur en histoire des sciences de l'Université de Pennsylvanie, est membre associé de la *Saïd Business School* de l'Université d'Oxford, en Angleterre. Bob TWIGGS, professeur à l'Université d'État de Morehead, dans le Kentucky, aux États-Unis, est l'un des créateurs du concept de CubeSat.

à la miniaturisation électronique et au développement des techniques de précision et de systèmes microélectromécaniques (notamment les minuscules accéléromètres que l'on trouve aujourd'hui dans de nombreux appareils, des *iPhone* aux airbags).

Dès la fin des années 1990, il semblait possible de créer des satellites fonctionnels ne pesant qu'un kilogramme, avec une taille qui réduirait les coûts de développement et de lancement et encouragerait les développeurs à concevoir de nouveaux types de missions. La NASA elle-même a encouragé les ingénieurs à proposer des approches meilleur marché de la science spatiale.

C'est dans ce contexte que l'un d'entre nous (Bob Twigg, alors à l'Université de Stanford) et Jordi Puig-Suari, à l'Université polytechnique d'État de Californie, se sont rendu compte que le concept de petit satellite ne décollerait pas sans un minimum de standardisation et sans partage des savoir-faire : il fallait suivre l'exemple des logiciels libres, qui avaient atteint à bon marché une notoriété mondiale simplement parce que leur code source était en libre circulation et améliorable par tous. C'est ainsi que les deux ingénieurs ont publié en 2000 le cahier des charges du CubeSat. Ce document de dix pages donne quelques recommandations simples : chaque unité doit être un cube de dix centimètres de côté (à un dixième de millimètre près) et donc occuper un volume de un litre. Par ailleurs, son poids ne doit pas dépasser un kilogramme. Les CubeSats peuvent également être rectangulaires, occupant le

volume de deux ou trois boîtes cubiques ; on parle alors de CubeSats 2U ou 3U (pour deux ou trois unités cubiques).

Un CubeSat est constitué d'un cadre métallique qui contient et protège l'électronique, les instruments, les systèmes de communications et d'alimentation. Les CubeSats sont en outre souvent équipés de panneaux solaires sur plusieurs côtés et d'une antenne extérieure ; certains seront sans doute bientôt dotés de systèmes de navigation rudimentaires, avec de minuscules tuyères capables de stabiliser l'attitude de vol de l'appareil et de l'orienter dans une direction donnée.

Des satellites conçus par des étudiants

Modulaires, les CubeSats sont lancés dans des châssis standards qui en contiennent plusieurs (à l'instar des bonbons dans un distributeur PEZ) et les éjectent une fois que la fusée a atteint l'orbite. En 2003, J. Puig-Suari a publié le plan d'un tel déployeur orbital, avec lequel il devenait possible de transporter et lancer en toute sécurité les CubeSats comme « passagers clandestins » sur les fusées lancées alors par les agences spatiales américaines et russes. La même année, l'entreprise *Pumpkin*, à San Francisco, a livré le premier kit commercial pour CubeSat – qui combine des composants prêts à l'emploi tels qu'une carte mère électronique, un cadre métallique, une batterie et des panneaux solaires – offrant un gain de temps aux scientifiques peu expérimentés en missions spatiales.

L'intérieur des CubeSats est aussi varié que les équipes qui les fabriquent. Ouvrez-en un et vous verrez un mélange de matériel aérospatial et de technologies disponibles dans le commerce ; des instruments scientifiques sur mesure ; du matériel recyclé de missions spatiales antérieures ; des équipements radio provenant de boutiques locales d'électronique ; ou du matériel informatique récupéré sur des micro-ordinateurs ou acheté sur *eBay*.

Depuis le début, les membres de la communauté CubeSat se sont appuyés sur l'expérience, les réussites et les astuces des uns et des autres ; les nouveaux arrivants apprennent vite que tout est mis en commun – hormis la charge utile du satellite, c'est-à-dire le matériel dédié à sa mission. Quand les développeurs font une découverte (un modèle de transmission pour



2. DES CHERCHEURS DE L'UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE à Berkeley ont conçu *Cinema*, un CubeSat triple (3U) pour étudier les tempêtes magnétiques à l'aide de capteurs miniaturisés, de détecteurs de particules et de magnétomètres embarqués.

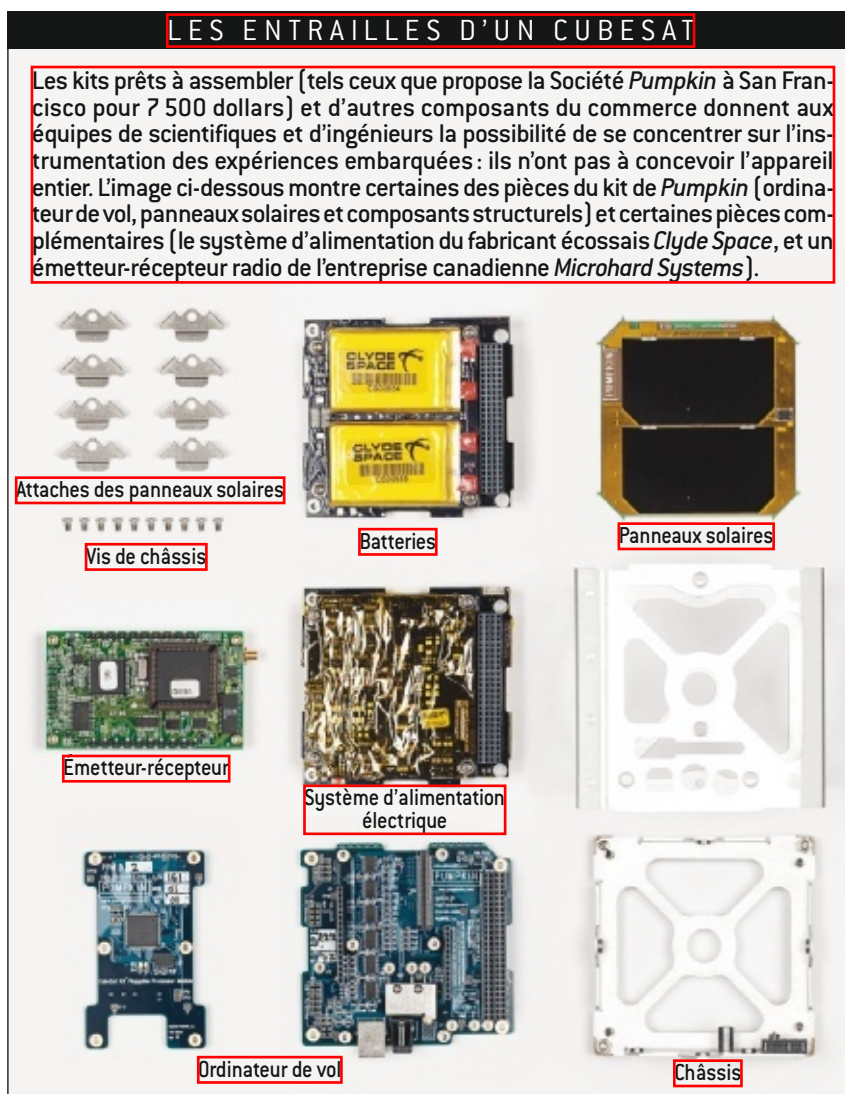
radioamateur qui fonctionne dans l'espace plus longtemps que les autres, par exemple), ils la partagent avec les autres concepteurs de CubeSats.

Nous nous sommes vite aperçus que les CubeSats intéressent les étudiants, et que ces derniers peuvent en tirer de nombreux enseignements. Les étudiants des programmes traditionnels de génie aérospatial travaillent sur des projets théoriques ou conçoivent de petites parties de gros systèmes qui rejoignent l'espace des années après la fin de leurs études. Un CubeSat, par contraste, est un objet que les étudiants peuvent tenir dans leurs mains. Il peut être construit par une équipe travaillant dans une seule pièce. Les étudiants peuvent créer des satellites fonctionnels en un ou deux ans, ce qui en fait des projets de thèse idéaux. Ils ont la responsabilité directe des projets CubeSat : même les étudiants de premier cycle peuvent être chefs de projet et spécialistes de mission, et la perspective d'envoyer le fruit de leur travail dans l'espace est une excellente motivation. Pour les enseignants, les CubeSats sont attrayants, car ils présentent tous les aspects d'ingénierie des grands satellites et offrent ainsi aux étudiants un moyen d'acquérir des bases solides et complètes sur leur conception.

Des expériences en microgravité

Ces dernières années, l'expérimentation sur CubeSat a rallié des scientifiques et des institutions de plus en plus variés. Les ingénieurs du secteur aérospatial et les astrophysiciens ont été rejoints par des professeurs et des étudiants d'autres domaines, et des entrepreneurs ont mis sur pied des compagnies offrant des services de lancement et un soutien. Des pays sans véritable programme spatial ont pu en démarrer un. La Suisse et la Colombie ont déjà lancé leurs premiers CubeSats, et plusieurs autres en préparent, telle l'Estonie. Avec les CubeSats, des programmes spatiaux voient même le jour à l'échelle de certains États des États-Unis. En particulier, le Kentucky a formé un consortium d'institutions académiques à but non lucratif pour bâtir une industrie du CubeSat.

Les premières missions à visée éducative étaient démonstratives : les « Beep-Sats », comme on surnommait ces premiers projets, transmettaient des signaux radio



pour confirmer qu'ils étaient fonctionnels et prouver que les petits satellites pouvaient communiquer avec des stations au sol. Depuis, l'état de l'art a évolué vers des objectifs scientifiques plus sérieux. La communauté CubeSat a aujourd'hui dépassé une « masse critique de missions réussies et importantes », note le technologue de la NASA Jason Cruzan, et a désormais les moyens de répondre à ses détracteurs.

Les CubeSats sont devenus des outils utilisés dans de nombreux domaines, dont certains sont controversés ou en friche. Lancé en 2003, *QuakeSat* devait aider à mieux prédire les séismes en détectant des changements du champ magnétique terrestre à très basse fréquence (quelques dizaines de hertz). *QuakeSat* a fonctionné quelques mois et renvoyé avec succès des données à sa station au sol basée à Stanford ; la plupart des sismo-

logues restent cependant sceptiques sur la relation entre les très basses fréquences et les tremblements de terre, ou sur l'intérêt de détecter les très basses fréquences depuis l'espace. *LightSail 1*, quant à lui, est un CubeSat 3U conçu par la *Planetary Society* pour tester la première voile solaire au monde – une technologie envisagée pour se propulser dans l'espace et, notamment, sillonner le Système solaire. La NASA a annoncé en février que le CubeSat avait été retenu pour un lancement prochain.

La NASA, les agences de renseignement et les militaires commencent aussi à expérimenter les CubeSats. Ce revirement est remarquable, car il y a encore quelques années, les spécialistes de l'espace pensaient que les CubeSats ne seraient jamais assez puissants ou sophistiqués pour mener des missions scientifiques ou de surveillance, ne seraient jamais commandés avec

précision et rejoindraient les déchets spatiaux qui s'accumulent sur les orbites terrestres basses. La microélectronique, les capteurs, les batteries et autres composants avaient beau s'améliorer, les organismes habitués à financer la construction de satellites de la taille d'une automobile (en centaines de millions d'euros et en milliers d'années de main-d'œuvre) n'imaginaient pas qu'un satellite de la taille d'une boîte à chaussures mérite la moindre attention.

Le programme *Colony 1* du Bureau de reconnaissance américain, par exemple, utilise des CubeSats pour tester en vol de nouvelles technologies avant de les installer sur de gros engins. D'autres scientifiques effectuent dans des CubeSats de la recherche pharmaceutique. Ainsi, le Bureau des petits engins spatiaux, au Centre de recherche Ames de la NASA, a placé en 2006 et 2007 deux CubeSats en orbite terrestre basse pour tester l'utilisation d'outils courants des « laboratoires sur puce », afin d'évaluer si les biologistes pourront réaliser des expériences bon marché en microgravité. Trois ans plus tard, le groupe a testé l'efficacité

de médicaments antibactériens en microgravité – une première étape vers l'élaboration d'une pharmacopée pour missions humaines de longue durée. Et en juillet 2010, l'entreprise *NanoRacks*, à Houston, a installé un support pour CubeSats sur la Station spatiale internationale et loue l'emplacement à des compagnies pharmaceutiques ou à d'autres industries qui souhaitent mener des recherches dans l'espace, ainsi qu'à des établissements d'enseignement, et même à un lycée.

Étudier la thermosphère

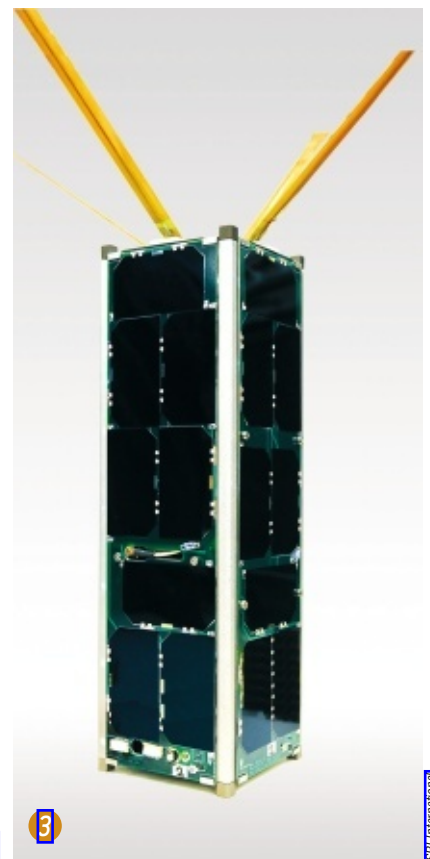
Certains CubeSats sont consacrés à la météorologie et au climat. *CloudSat*, conçu par des scientifiques de l'Université d'État du Colorado, étudiera la structure verticale des nuages et leur formation sur des périodes de plusieurs jours, ce que les météorologues embarqués sur des avions ne peuvent pas faire. La mission *Firefly*, soutenue par la *National Science Foundation*, déploiera un détecteur de rayons

gamma et un photomètre pour mesurer les éclairs de rayons gamma terrestres qui jaillissent de l'atmosphère en direction de l'espace, en général lors des orages.

CloudSat et *Firefly* observeront des phénomènes se déroulant dans la troposphère, la couche atmosphérique de 16 kilomètres d'épaisseur dans laquelle nous vivons. Une autre classe de CubeSats étudiera la thermosphère (entre 90-100 kilomètres et 600 kilomètres d'altitude). La thermosphère est balayée par le vent solaire et le plasma ionisé éjecté par la couronne solaire, et est perturbée par l'activité magnétique des taches solaires ; sa limite supérieure s'élève et s'abaisse en fonction de l'activité solaire. Ces variations interfèrent parfois avec les performances des satellites en orbite basse : la Station spatiale américaine *Skylab* s'est désintégrée en 1979 quand un pic d'activité inattendu dans la thermosphère a augmenté la force de traînée exercée sur la station et l'a attirée vers la Terre. La Station spatiale internationale, les satellites du système GPS, de la radio et de la télévision sont en orbite dans la thermosphère.

LA SCIENCE SPATIALE, NOUVELLE ACTIVITÉ DOMESTIQUE

- 1 La Faculté et les étudiants de Cal Poly, l'Université polytechnique d'État de Californie, testent ici un système magnétique pour ajuster l'attitude de vol d'un CubeSat, dans le cadre de la préparation de CP6, une mission CubeSat lancée avec succès en 2009.
- 2 La Suisse a lancé son premier satellite, le *SwissCube*, en 2009. Construit par une équipe qui comptait environ 200 étudiants, ce CubeSat a observé la lueur créée dans la haute atmosphère par les rayons cosmiques.
- 3 Le *Radio Aurora Explorer*, lancé en novembre dernier, étudiera comment le vent solaire perturbe l'ionosphère de la Terre. Il a été construit par l'Université du Michigan et l'Institut de recherche américain *SRI International*.
- 4 Le CubeSat *O/OEOS* (*Organism/Organic Exposure to Orbital Stresses*) de la NASA, lancé en novembre dernier, évaluera la possibilité de faire des expériences biologiques en microgravité à bas coût.
- 5 Des étudiants de l'Université de Liège, en Belgique, construisent le CubeSat *OUTI* (*Orbital Utility for Telecommunications Innovation*) pour les communications radio numériques.



phère: comprendre comment se comporte cette couche est donc aussi important pour les communications et la science que l'étude des océans l'est pour le commerce mondial. Or les gros satellites évoluant sur des orbites plus hautes ne peuvent pas observer directement la thermosphère; ils la voient coincée entre l'exosphère (la dernière couche de l'atmosphère terrestre) et la mésosphère (entre 50 et 100 kilomètres d'altitude environ), tandis que les instruments des fusées sondes prennent des mesures directes, mais seulement le long de la trajectoire de la fusée et durant quelques minutes...

Le premier CubeSat de la thermosphère à atteindre l'espace a été le *SwissCube* de la Suisse, lancé fin 2009. Le *SwissCube* mesure et cartographie la lumière du ciel nocturne, c'est-à-dire la faible émission de lumière issue de réactions chimiques et physiques dans la haute atmosphère, afin d'aider les scientifiques à mieux comprendre ses causes et à la filtrer plus efficacement lorsqu'ils étudient d'autres phénomènes atmosphériques ou terrestres.

L'innovation la plus révolutionnaire apportée par les CubeSats a peut-être été l'introduction d'un nouveau modèle économique dans le domaine spatial. Les CubeSats étant lancés « en seconde classe » dans une fusée affrétée pour une autre mission, les équipes font des économies et partagent les frais. La contrainte principale devient la date de lancement, qui est imposée. En outre, grâce aux faibles coûts, l'échec est mieux toléré tout au long de la conception et du développement: si un CubeSat explose sur l'aire de lancement ou ne se déploie pas dans l'espace, c'est très décevant, mais pas catastrophique (et il y a des ratés: 14 CubeSats ont été perdus à cause d'une panne de fusée en 2006, et 9 autres n'ont pas établi le contact avec la station au sol ou de façon très limitée). Lorsque des satellites classiques sont lancés, plusieurs millions d'euros sont en jeu, contre 70 000 euros pour les CubeSats.

Des satellites jetables

Certaines équipes vont plus loin: elles placent délibérément leurs CubeSats sur des orbites autodestructrices, afin que ceux-ci retombent et se consomment dans l'atmosphère une fois leur mission terminée. « Les CubeSats peuvent aller à des endroits où leur durée de vie sera courte », note J. Puig-Suari. « Je peux faire un satellite jetable que j'enverrai dans des lieux dangereux. Non seulement sa perte n'est pas un problème, mais on peut l'utiliser à notre avantage. »

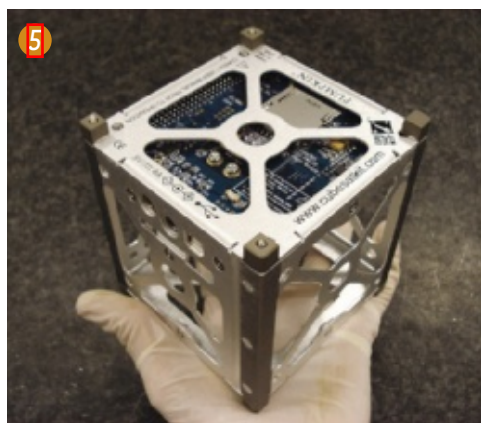
Deux exemples de cette approche sont des missions à la conception desquelles B. Twigg a contribué. La première est une collaboration d'équipes européennes, asiatiques et américaines appelée QB50. Le consortium va lancer 50 CubeSats 2U à la limite externe de la thermosphère. Sur plusieurs mois, à mesure que les frottements de l'atmosphère ralentiront les satellites, leurs orbites vont se dégrader, et ils vont recueillir des informations sur la composition chimique, la densité et la température de la thermosphère à des altitudes de plus en plus basses, jusqu'à ce qu'ils retombent sur Terre.

Le second exemple est une mission nommée POPACS (*Polar Orbiting Passive Atmospheric Calibration Sphere*). Trois CubeSats 3U seront lancés pour mesurer l'échauffement de l'atmosphère terrestre par les éruptions solaires. Tandis que les

Si un CubeSat explose sur l'aire de lancement ou ne se déploie pas dans l'espace, c'est très décevant, mais pas catastrophique.



WASSMANN



UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER 2

✓ SUR LE WEB

Le site officiel du projet CubeSat : www.cubesat.org

Le site d'AMSAT, la corporation des satellites radioamateurs : www.amsat.org/amsat-new/

Le site du CubeSat *Robusta* réalisé à l'Université de Montpellier 2 : www.ies.univ-montp2.fr/robusta/

✓ BIBLIOGRAPHIE

CubeSat Design Specification Revision 12, California Polytechnic State University, 2009. Disponible sur Internet : www.cubesat.org/images/developers/cds_rev12.pdf

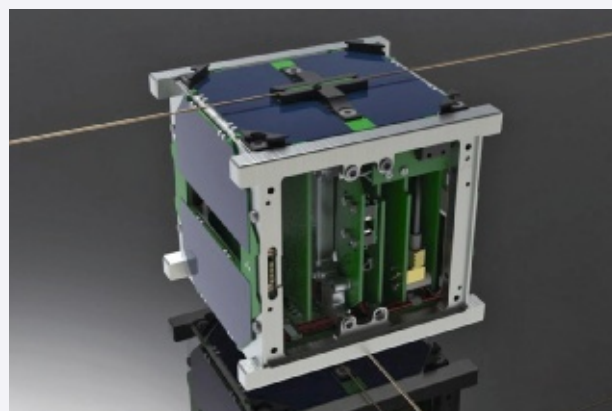
XaTcobeo, Robusta & co : les CubeSats européens

Avant la fin de l'année, le nouveau lanceur européen VEGA mettra sur orbite 9 CubeSats retenus parmi 22 candidats, tous conçus et fabriqués par des universités européennes. Le succès de cet appel à projets de l'Agence spatiale européenne montre que l'Europe n'est pas en reste : le phénomène CubeSat a initié un bouillon de culture technologique et scientifique d'où pourrait bien émerger la technologie spatiale de demain.

Limités en masse et en puissance, les CubeSats sont condamnés à l'innovation. Loin de brider la créativité, le standard CubeSat se trouve décliné en d'innombrables solutions technologiques au service d'une grande variété de missions, de la démonstration technologique aux véritables missions scientifiques. Ainsi, le CubeSat *XaTcobeo*, de l'Université de Vigo, en Espagne, va tester un système de déploiement de panneaux solaires et d'une antenne, ainsi qu'un dispositif de mesure des rayonnements ionisants et un nouveau système radio. Le CubeSat *E-ST@R*, de l'École polytechnique de Turin, en Italie, testera quant à lui un système de contrôle et de détermination de l'attitude du CubeSat. De même, *OUFTI-1*, de l'Université de Liège, en Belgi-

que, et *UWE-3*, de l'Université de Würzburg, en Allemagne, testeront diverses innovations techniques. Les CubeSats italiens *UNICubeSAT*, de l'Université de Rome, et *AtmoCube*, de l'Université de Trieste, vont étudier l'atmosphère terrestre au-dessus de 350 kilomètres d'altitude, tandis que *Goliath*, de l'Université de Bucarest, en Roumanie, prendra des photos de la Terre et détectera les micrométéorites et les rayons cosmiques.

Aujourd'hui, la communauté des CubeSats doit faire face à de nouveaux défis liés à l'accumulation des débris et à la saturation des orbites : la charte des débris spatiaux, dont la France est signataire, impose que tout satellite lancé soit désorbité en moins de 25 ans. Or, si un satellite placé sur une orbite basse redescend en quelques mois, ceux placés sur des orbites supérieures nécessitent une manœuvre de désorbitation que peu de CubeSats sont aujourd'hui capables d'effectuer. Plusieurs projets européens étudient cet aspect : l'Association française des radioamateurs AMSAT-F encadre *Libellule*, un projet étudiant de voile solaire qui se déploiera sur un triple CubeSat pour le freiner et le désorbiter. *PW-Sat*, de l'Université de technologie de Var-



Le CubeSat *Robusta*, de l'Université Montpellier 2.

sovie, en Pologne, testera un système similaire.

En outre, les CubeSats sont souvent construits à partir de composants commerciaux dont la fiabilité n'est pas garantie, vis-à-vis des rayonnements ionisants en particulier. De ce fait, l'espérance de vie d'un CubeSat est de quelques mois pour une occupation d'orbite de plusieurs années. En France, à l'Université Montpellier 2, le groupe RADIAC de l'Institut d'électronique du Sud (IES, UMR 5214, CNRS) étudie les effets des rayonnements ionisants sur les composants électroniques. De ces travaux est né *Robusta*, le premier CubeSat français. Pour répondre à l'appel à idée Expresso du

CNES, plusieurs composantes de l'université (la Faculté des sciences, l'IUT de Nîmes, l'école Polytech Montpellier) et trois unités mixtes de recherche Université Montpellier 2-CNRS (IES, IIRMM, LMGC) ont mis leur savoir-faire en commun. Le CubeSat *Robusta*, qui embarquera sur VEGA, validera dans l'environnement radiatif spatial réel une méthode de test des composants mise au point à l'IES. Parrainé par le CNES, *Robusta* est un projet d'enseignement et de recherche auquel plus de 250 étudiants de tous niveaux ont déjà participé.

Laurent Dusseau

Professeur à l'Univ. Montpellier 2
Coordinateur du projet *Robusta*

satellites traverseront l'atmosphère polaire, les scientifiques regarderont comment leurs orbites se dégradent ; ils espèrent ainsi mieux prédire la relation entre la thermosphère et l'activité solaire.

Place aux amateurs !

De façon générale, il est rare qu'un CubeSat soit envoyé seul, car sa petite taille et la faiblesse de son système de communication limitent fortement la quantité de données qu'il pourra recueillir. C'est notamment pour cette raison que la plupart des missions ont été effectuées avec des cubes doubles ou triples, et que les scientifiques expérimentent maintenant le déploiement de réseaux de CubeSats où les satellites se coordonnent et coopèrent, comme des oiseaux qui s'assemblent en vol pour migrer. Les développeurs travaillent sur les communications intersatellites, des systèmes permettant le vol en formation, et même

des câbles de plusieurs kilomètres pour maintenir les satellites groupés.

La DARPA (l'Agence américaine des projets de recherche avancée sur la défense), quant à elle, parraine un projet de recherche de 75 millions de dollars sur les réseaux de CubeSats pour comprendre dans quelles circonstances les CubeSats seraient à même de remplacer les satellites classiques. Des constellations stables de CubeSats pourraient même fournir une alternative aux grands instruments : Gil Moore, professeur émérite à l'Université d'État de l'Utah, nous voit bientôt capables de déployer de grands réseaux éparpillés qui remplaceront les télescopes spatiaux *Hubble* et *Webb*.

Pour étendre encore les capacités des CubeSats, Paulo Lozano, de l'Institut de technologie du Massachusetts, a développé un minuscule système de propulsion électronique qui permettrait aux CubeSats de changer d'orbite. D'autres

travaillent sur l'impression de composants de CubeSats pour réduire les coûts.

À terme, prédit Andrew Kalman, président et architecte technique en chef de la Société *Pumpkin*, les CubeSats seront pour les scientifiques comme des ordinateurs personnels, des fondations sur lesquelles les individus construiront leurs propres applications. Cette idée en suggère une autre encore plus révolutionnaire : si les CubeSats deviennent les ordinateurs personnels de la science spatiale (bon marché, flexibles, banalisés et standardisés), l'espace sera accessible aux amateurs. Cela pourrait arriver très vite : la jeune entreprise spatiale *Interorbital Systems* de Mojave, en Californie, projette d'offrir des kits de CubeSats et des lancements en orbite basse pour moins de 7000 euros. « Les amateurs auront une chance de participer », commente J. Puig-Suari. « Les gens vont commencer à construire leurs propres mini-*Hubble*. »

À découvrir en kiosque
et sur www.pourlascience.fr



20 pages - prix de vente : 6,95 €

La matière connue n'est qu'une goutte d'eau dans l'Univers. De quoi celui-ci est-il majoritairement constitué ? Que sont ces étranges matière noire et énergie sombre ? Comment imaginer le début et la fin de l'Univers ? Un titre indispensable pour faire le point sur les grandes questions de cosmologie.
→ Feuilletez les premières pages sur pourlascience.fr

HISTOIRE DES SCIENCES

L'élan de Jefferson sauve la réputation de l'Amérique

Alors que les États-Unis se construisaient en tant que nation, Thomas Jefferson combattit l'image d'une Amérique dégénérée, créée par le naturaliste Buffon et ses disciples européens.

Lee DUGATKIN

Thomas Jefferson est surtout connu pour être l'auteur principal de la Déclaration d'indépendance des États-Unis (1776). Mais cet homme politique et homme d'État (président des États-Unis entre 1801 et 1809) était aussi un scientifique. Jefferson a ainsi consacré une grande partie de son énergie à discréditer une idée répandue en Europe, selon laquelle l'Amérique était une terre dégénérée. Cette dégénérescence était, disait-on de l'autre côté de l'Atlantique, évidente de par la flore, la faune et la population américaines, toutes faibles et rabougries.

Jefferson était mû par bien plus que de la fierté : avec d'autres fondateurs de la nation, il pensait que la croissance et la prospérité de leur pays dépendaient de l'issue de cette bataille. Celle-ci fut suffisamment importante pour être mentionnée lors des funérailles de Jefferson en 1826 : dans son panégyrique, le sénateur de l'État de New York compara cette campagne à une seconde proclamation d'indépendance. Comment est apparue en Europe cette idée de dégénérescence de l'Amérique ? Comment Jefferson la démonta-t-il ? Nous verrons que la bataille s'est achevée grâce à... un spécimen d'original, l'élan d'Amérique du Nord.

La croyance européenne en une infériorité de l'Amérique est issue, dans une large mesure, du naturaliste le plus influent du XVIII^e siècle, le Français Georges Louis Leclerc, comte de Buffon (1707-1788). Auteur d'une *Histoire naturelle* en 36 volumes (de 1749 à 1789), Buffon souhaitait fournir « la description complète & l'histoire exacte de chaque chose en particulier » sur Terre. Son *Histoire naturelle* a connu un immense succès et est devenue le sujet de conversation des

salons parisiens ; elle a été traduite en anglais, en allemand et en néerlandais. L'attitude française vis-à-vis de l'Amérique est née et a été entretenue dans les cercles philosophiques qui entouraient Buffon, explique l'historien Philippe Roger en 2002 dans un essai sur l'antiaméricanisme français.

La théorie de la dégénérescence

Dans les volumes IX et XIV de son *Histoire naturelle*, parus en 1761 et en 1766, Buffon soutient que la plupart des animaux – et des hommes – sont plus petits dans les Amériques que dans l'Ancien Monde à cause de conditions plus froides et plus humides. Certes, concède Buffon, les grenouilles et les insectes sont plus grands en Amérique : certaines grenouilles pèsent jusqu'à 16 kilogrammes. Mais pour lui, ces exceptions ne font que confirmer la règle de la dégénérescence : qu'y a-t-il de plus répugnant qu'une grenouille ou un moustique énormes ?

Buffon s'appuie sur quatre assertions : les animaux présents dans les deux hémisphères sont plus petits et plus faibles dans le Nouveau Monde ; les animaux qui vivent uniquement dans le Nouveau Monde sont plus petits que les espèces similaires de l'Ancien Monde ; le Nouveau Monde compte moins d'espèces ; enfin, le Nouveau Monde provoque une dégénérescence du bétail.

Les lecteurs de l'*Histoire naturelle* apprennent ainsi que les brebis élevées dans le Nouveau Monde sont « plus maigres, et les moutons ont en général la chair moins succulente et moins tendre qu'en Europe », que le Nouveau Monde n'héberge que la moitié des espèces de l'Ancien Monde et que

celles-ci constituent un ensemble hétéroclite. Buffon soutient même que la plupart des oiseaux américains ne peuvent chanter – un mensonge fondé sur un vers d'un poème de Oliver Goldsmith (1769) sur la nature sauvage de la Géorgie : « Ces bois enchevêtrés, où les oiseaux oublient de chanter. »

Après les animaux, Buffon décrit les populations indigènes. Selon lui, les Amérindiens n'ont « nulle vivacité, nulle activité dans l'ame ». Ils sont « une espèce d'automate impuissant, incapable de réformer [la nature] ou de la seconder ». Ainsi, pour Buffon, les Américains autochtones sont responsables du triste spectacle offert par le reste des occupants du Nouveau Monde. N'ayant pas réussi à apprivoiser la nature, ils n'ont pas su produire un environnement favorable à la formation de spécimens animaux plus robustes.

Buffon n'a jamais quitté l'Europe. Il s'appuie sur les publications d'histoire naturelle et sur les comptes rendus des voyageurs. Une pratique courante à l'époque : les commerçants et les missionnaires prennent des notes sur les animaux qu'ils rencontrent, en particulier les espèces inconnues. Buffon compare et synthétise ces notes. Ce système comportait des failles évidentes – des histoires invraisemblables –, ce que Buffon admettait. Par exemple, un certain Peter Kalm, envoyé par l'Académie suédoise pour étudier l'histoire naturelle de l'Amérique, a prétendu avoir vu un ours tuer une vache en la mordant, puis en soufflant dans la blessure jusqu'à ce que la vache explose et meure. Comparés à ces fictions, des rapports moins extrêmes devaient être faciles à accepter, et Buffon a utilisé nombre de telles informations comme preuve de dégénérescence dans son *Histoire naturelle*.

Pour les descendants spirituels de Buffon – tels l'abbé prussien Cornelius de Pauw et l'abbé français Guillaume-Thomas Raynal –, la dégradation touche tout ce qui vit dans le Nouveau Monde. Le seul point faible de la théorie de Buffon, selon eux, est qu'elle ne va pas assez loin. Ils l'étendent à tous les Américains, y compris les Européens émigrés et leurs descendants. De Pauw soutient que les chiens américains sont muets. Confident de Frédéric le Grand, qui voulait décourager les entreprises européennes dans le Nouveau Monde pour laisser le champ libre aux Prussiens, de Pauw avait très probablement des motifs personnels pour se livrer à une telle propagande.

Raynal est un personnage plus respecté et complexe que de Pauw. Dans son *Histoire philosophique et politique des établissements et du commerce des Européens dans les deux Indes* (volume 7), publiée au début des années 1770, il écrit : « On doit être étonné que l'Amérique n'ait pas encore produit un bon poète, un habile mathématicien, un homme de génie dans un seul art, ou une seule science. » Raynal a cependant révisé son opinion dès la fin des années 1760, après un dîner avec Benjamin Franklin et d'autres Français et Américains.

« L'astuce de Franklin » Benjamin Franklin est alors un scientifique renommé. Ses travaux sur la foudre, publiés en 1752 à la *Royal Society* londonienne, sont un classique. Lors du repas, raconte Jefferson en 1818 dans une lettre, Raynal « envint à sa théorie favorite sur la dégénérescence des animaux, et même de l'homme, en Amérique ». Franklin eut alors l'idée d'un test impromptu sur les effets du Nouveau Monde. Ayant remarqué que les Américains se trouvaient d'un côté de la table et les Français de l'autre, il proposa : « Levons-nous tous, et nous verrons de quel côté la nature a dégénéré. » Les Américains étaient plus grands, et l'abbé lui-même « n'était qu'un nabot ».

L'astuce de Franklin

1. JEFFERSON VOYAIT DANS L'ORIGINAL (ou élan, ci-dessous) une preuve décisive contre l'idée répandue en Europe selon laquelle la faune américaine était petite et faible. Buffon, un des auteurs de cette théorie, avait écrit dans son *Histoire naturelle* que « l'original [...] est le même animal que l'élan, mais [...] n'est pas si grand ».

L'AUTEUR



Lee DUGATKIN est professeur au Département de biologie de l'Université de Louisville, dans le Kentucky, aux États-Unis.



PHOTO: RICHTER AGES

Raynal publie quand même son *Histoire philosophique et politique*. Dans la troisième édition, cependant, il renonce à sa vision dégénérée de l'Amérique. L'idée est toutefois déjà bien établie dans l'esprit des Européens.

Jefferson contrecarre le comte

C'était une chose de voir les Américains comme des parvenus, des mécontents et des menaces contre la monarchie – après tout, ils l'étaient. C'en était une autre de dire que toutes les formes de vie en Amérique, y compris ses populations indigènes et ses immigrants européens, étaient dégénérées. Jefferson, le plus francophile des pères fondateurs (il sera ambassadeur en France entre 1785 et 1789), se fait donc violence pour réfuter Buffon et ses partisans. Il attaque Buffon avec un ensemble imparable de faits. Dans ses *Notes sur l'État de Virginie*, écrites en 1781 quand

il était gouverneur de cet État, et publiées en France en 1785, puis aux États-Unis en 1787, il démantèle point par point la théorie de la dégénérescence. Il y inclut des tableaux comparant des mesures de la taille des animaux qui réfutent la thèse de Buffon. Il soutient que les idées du comte sont mal fondées et les données qu'il a recueillies auprès des voyageurs inexactes.

Existe-t-il la moindre preuve, demande Jefferson, que les environnements de l'Ancien et du Nouveau Monde sont si différents ? « Comme si les deux côtés n'étaient pas réchauffés par le même bienveillant soleil ; comme si un sol de la même composition chimique était moins susceptible de produire des nutriments pour les animaux ; comme si les fruits et les graines issus de ce sol et du soleil [...] conféraient moins de croissance aux solides et aux fluides du corps, ou produisaient plus tôt dans les cartilages, les membranes et les fibres cette rigidité qui freine tout développement ultérieur et met fin à la

croissance d'un animal. » La vérité, écrit Jefferson, « est qu'un Pygmée et un Patagonien, une souris et un mammoth doivent leur taille aux mêmes substances nutritives ».

Jefferson n'est pas le seul père fondateur à s'insurger. Pour son ami John Adams, les idées de de Pauw sont « des rêves méprisables ». Franklin, quant à lui, conteste l'argument de l'humidité. Il parcourt le monde en collectant une masse de données et, en 1780, conclut que l'humidité, la cause supposée de la dégénérescence, est plus élevée en Europe que dans les colonies américaines.

Alexander Hamilton, l'un des futurs rédacteurs de la Constitution américaine, qui craint que la théorie de la dégénérescence n'étouffe les relations commerciales, défend l'Amérique dans *Le Fédéraliste*, un recueil d'articles visant à promouvoir l'idée d'une constitution américaine ; l'unique note de bas de page du 11^e numéro est une réfutation de l'assertion absurde de de Pauw selon laquelle les chiens américains n'aboieraient pas.

Et James Madison, qui deviendra le successeur de Jefferson à la présidence des États-Unis, s'est même improvisé assistant de recherche. En juin 1786, il conclut une lettre envoyée à Jefferson par une discussion sur les belettes, complétée de mesures : les espèces américaines sont aussi grandes que leurs équivalents européens. Madison écrit à son mentor que cette découverte « contredit avec certitude l'assertion [de Buffon] selon laquelle, parmi les animaux vivant sur les deux continents, ceux du nouveau sont toujours plus petits que ceux de l'ancien ». Pour les deux hommes, combattre Buffon était manifestement aussi important que l'élaboration d'une convention constitutionnelle ou que les besoins du trésor public de leur nouvelle nation.

Jefferson pensait que le démantèlement méthodique de la théorie de la dégénérescence dans ses *Notes sur l'État de Virginie* permettrait aux gens de rejeter ces inepties. Il souhaitait convaincre Buffon lui-même de revenir sur sa théorie. Ainsi, avant de partir pour la France en tant qu'ambassadeur, il est déterminé à présenter à Buffon un animal américain si impressionnant qu'il force cette sommité française à changer d'opinion. C'est là qu'entre en scène *Alces*

Le Nouveau Monde selon Buffon

« Dans le nouveau continent les animaux des provinces méridionales sont tous très-petits en comparaison des animaux des pays chauds de l'ancien continent. Il n'y a en effet nulle comparaison pour la grandeur de l'éléphant, du rhinocéros, de l'hippopotame, de la giraffe, du chameau, du lion, du tigre, etc. tous animaux naturels et propres à l'ancien continent, et du tapir, du cabiai, du fourmiller, du lama, du puma, du jaguar, etc. qui sont les plus grands animaux du nouveau monde ; les premiers sont quatre, six, huit et dix fois plus gros que les derniers.

Une autre observation qui vient encore à l'appui de ce fait général, c'est que tous les animaux qui ont été transportés d'Europe en Amérique, comme les chevaux, les ânes, les bœufs, les brebis, les chèvres, les co-

chons, les chiens, etc. tous ces animaux, dis-je, y sont devenus plus petits ; et que ceux [...] qui sont communs aux deux mondes, tels que les loups, les renards, les cerfs, les chevreuils, les élans sont aussi considérablement plus petits en Amérique qu'en Europe, et cela sans aucune exception.

Il y a donc dans la combinaison des éléments et des autres causes physiques, quelque chose de contraire à l'agrandissement de la Nature vivante dans ce nouveau monde ; il y a des obstacles au développement et peut-être à la formation des grands germes ; ceux mêmes qui, par les douces influences d'un autre climat, ont reçu leur forme plénière et leur extension toute entière, se resserrent, se rapetissent sous ce ciel avaro et dans cette terre vuide, où l'homme en petit nombre étoit épars, errant ;

où loin d'user en maître de ce territoire comme de son domaine, il n'avoit nul empire ; où ne s'étant jamais soumis ni les animaux ni les éléments, n'ayant ni dompté les mers, ni dirigé les fleuves, ni travaillé la terre, il n'étoit en lui-même qu'un animal du premier rang, et n'existoit pour la Nature que comme un être sans conséquence, une espèce d'automate impuissant, incapable de la réformer ou de la seconder [...]. Car quoique le Sauvage du nouveau monde soit à peu près de même stature que l'homme de notre monde, cela ne suffit pas pour qu'il puisse faire une exception au fait général du rapetissement de la Nature vivante dans tout ce continent : le Sauvage est foible et petit par les organes de la génération. »

Buffon, *Histoire naturelle*, vol. IX, p. 102

alces, l'orignal (nommé élan en Europe), le plus grand des cervidés.

Jefferson commence sa recherche d'un grand orignal en envoyant à ses amis une étude en 16 points sur les habitudes, la taille et l'histoire naturelle de l'animal. Il fait savoir que si des chasseurs pouvaient lui procurer le squelette d'un orignal géant, il leur serait profondément redevable. Le gouverneur du New Hampshire, John Sullivan, général pendant la guerre de l'Indépendance, lui répond avec enthousiasme et s'attèle à la tâche.

Après son arrivée en France, Jefferson obtient une invitation à rencontrer Buffon. Leur conversation porte sur de nombreux sujets, y compris la théorie de la dégénérescence. Jefferson dit au comte que « le renne européen pourrait passer sous le ventre de notre orignal ». Jefferson sort de la réunion avec l'impression que Buffon céderait si seulement il voyait un énorme orignal.

Enfin, au cours de l'hiver 1786-1787, Jefferson reçoit de bonnes nouvelles : Sullivan s'est procuré les restes d'un orignal auprès d'un certain capitaine Colburn, qui a tué un spécimen de plus de 2,10 mètres dans le Vermont. Il faut 14 jours à une équipe de plusieurs hommes pour amener l'orignal au domicile de Sullivan. Sullivan engage alors un capitaine de navire pour que celui-ci embarque l'orignal lors de son prochain voyage transatlantique.

Tout se déroule selon le plan prévu, mais, pour une raison inconnue, l'orignal reste à quai lorsque le bateau prend la mer. Sullivan envoie la mauvaise nouvelle. Désespéré, Jefferson écrit à un ami que « la caisse, les os, tout a disparu ; ainsi, ce chapitre de l'histoire naturelle restera encore une page blanche ». Il ignore encore que Sullivan a récupéré l'orignal et a engagé un autre navire. Le spécimen arrive à Paris vers le 1^{er} octobre 1787.

Triomphal, Jefferson souhaite apporter l'orignal à Buffon en personne, mais ce dernier, malade, ne reçoit pas de visiteurs. Il envoie donc l'orignal à l'assistant de Buffon. Le comte vit apparemment l'orignal, car Jefferson écrit que cet animal géant avait « convaincu Monsieur Buffon. Il a promis dans son prochain volume de rétablir l'exactitude de ces choses ». Six mois plus tard, cependant, Buffon décédait sans avoir publié aucune révi-

sion de sa théorie. L'*Histoire naturelle*, si influente, était ainsi vouée à promouvoir la théorie d'un Nouveau Monde dégénéré.

L'idée d'une Amérique dégénérée a persisté et évolué pendant une soixantaine d'années avant de laisser place à un anti-américanisme général. Deux factions se sont constituées. En Europe, le philosophe allemand Emmanuel Kant et le poète anglais John Keats acceptaient la dégénérescence dans son ensemble. Keats décrivait l'Amérique comme le seul endroit où « la Grande Nature infallible semble pour une fois s'être trompée ». Kant, manquant ici de raison pure, écrivait de de Pauw que « même si neuf dixièmes de son matériel ne sont pas étayés ou sont incorrects, cet effort d'intelligence même mérite des éloges et une émulation ».

Le nouveau mythe américain

Sur le continent américain, Jefferson compte parmi ses partisans les écrivains lord Byron, Washington Irving et Henry David Thoreau, et le géographe Jedidiah Morse (le père de l'inventeur du télégraphe électrique, Samuel Morse). Byron appelait l'Amérique « un grand climat ». Irving mettait en pièces la théorie de Buffon dans *The Sketchbook of Geoffrey Crayon*, écrivant qu'il « allait visiter ce pays merveilleux [l'Europe] et voir cette race gigantesque à partir de laquelle j'ai dégénéré ». Thoreau a utilisé son ouvrage *Walking* comme une tribune « pour s'opposer au compte rendu de Buffon sur cette partie du monde et ses productions ». Et Morse discrédita la théorie de la dégénérescence dans les dix premières pages de son manuel de géographie, qui fut lu par la première génération d'écoliers de la nouvelle nation américaine.

Réagissant à cette idée de l'infériorité du Nouveau Monde, ces écrivains américains ont forgé un récit contradictoire, décrivant l'Amérique comme une région magnifique, vaste, riche en ressources et peuplée d'individus robustes. L'identité américaine à ce jour – et les réactions du reste du monde à cette image de soi moderne – pourrait remonter en partie à la destruction par Jefferson, ses pairs et ses successeurs, du mythe d'une dégénérescence biologique en Amérique.



2. GEORGES LOUIS LECLERC, comte de Buffon.



3. THOMAS JEFFERSON.

✓ À ÉCOUTER

Jeudi 16 juin 2011, Stéphane Schmitt (REHSEIS), spécialiste de Buffon, évoquera la controverse dans l'émission **La marche des sciences**, sur France Culture de 14h à 15h. www.franceculture.com

✓ BIBLIOGRAPHIE

L. A. Dugatkin, *Mr. Jefferson and the Giant Moose : Natural History in Early America*, University of Chicago Press, 2009.

Buffon, *Œuvres*, La Pléiade, Gallimard, 2007.

Buffon, *Histoire naturelle*, 1749-1804, édition en ligne : <http://www.buffon.cnrs.fr/>

LOGIQUE & CALCUL

Le calculateur amnésique

*Un calculateur sans mémoire est-il sérieusement limité ?
Les résultats de l'algorithmique in situ montrent que non :
avec un peu d'astuce, il s'en sortira toujours.*

Jean-Paul DELAHAYE

*J'ai la mémoire qui flanche
Je me souviens plus très bien
De quelle couleur étaient ses yeux
Je crois pas qu'ils étaient bleus
Étaient-ils verts ? Étaient-ils gris ?
Étaient-ils vert-de-gris ?
Du changeaient-ils tout le temps de couleur
Pour un non, pour un oui ...
Jeanne Moreau, Cyrus Bassiak
et François Rauber*

Si vous avez déjà écrit des programmes informatiques, vous avez nécessairement été confronté au problème suivant : deux nombres sont stockés dans les variables A et B , par exemple $A = 44$ et $B = 13$, et vous voulez échanger le contenu de A et B pour obtenir $A = 13$ et $B = 44$. La méthode classique, que tout le monde réinvente, consiste à utiliser une variable C et à écrire la séquence de trois instructions : $C := A$; $A := B$; $B := C$.

Le signe $:=$ est celui de l'affectation. L'instruction $X := Y$ signifie que nous lisons le contenu de Y et que nous le mettons dans X , ce qui efface le contenu de X sans changer celui de Y . Cette séquence de trois affectations pour l'échange de deux valeurs exige l'utilisation d'une variable C supplémentaire. Or nous pouvons échapper à l'introduction de ce complément de mémoire par la séquence suivante : $A := A + B$; $B := A - B$; $A := A - B$. Le déroulement du calcul donne :

	A	B
Au départ :	44	13
Après $A := A + B$:	57	13
Après $B := A - B$:	57	44
Après $A := A - B$:	13	44

La suite d'instructions est valable avec n'importe quelles valeurs à la place de 44 et 13. Elle fonctionne aussi avec des valeurs booléennes où les signes $+$ et $-$ sont remplacés par xor qui désigne l'opération « ou exclusif » ($0 xor 0 = 0$; $0 xor 1 = 1$; $1 xor 0 = 1$; $1 xor 1 = 0$). La suite d'instructions est :
 $A := A xor B$; $B := A xor B$; $A := A xor B$, où A et B valent 0 ou 1.

Vérifions que la séquence permute bien les valeurs de A et B en examinant l'effet de chaque opération. La première affectation met $(A xor B)$ dans A . La deuxième met donc $((A xor B) xor B)$ dans B ; mais, d'après l'associativité du xor , cela vaut $(A xor (B xor B))$ c'est-à-dire A , puisque $(B xor B) = 0$ et que $A xor 0 = A$. La troisième affectation met donc $(A xor B) xor A$ dans A ; comme $(A xor B) xor A = (A xor (B xor A))$, cela donne, par commutativité, $(A xor (A xor B)) = ((A xor A) xor B) = (0 xor B) = B$. Il y a bien échange.

Ce type de calcul est dénommé calcul *in situ* ou *calcul sans mémoire*. L'idée est d'opérer les calculs sans faire appel à des variables de stockage autres que celles qui communiquent les données au programme, que l'on utilise pour calculer et pour placer les résultats une fois les opérations terminées. L'étude de ce calcul *in situ* a pour fonction d'identifier ce que peut calculer un amnésique qui, ne disposant de rien d'autre que l'espace mémoire des données du calcul, le réutilise car il n'a en propre aucune mémoire à sa disposition.

Avant de donner des détails sur les résultats obtenus par les chercheurs qui étudient

cette algorithmique *in situ*, et pour bien en mesurer la difficulté, posons-nous une petite énigme.

Considérons une permutation circulaire de trois données A, B, C , où l'on cherche à passer de $A = 3, B = 50, C = 700$ à $A = 50, B = 700, C = 3$. Nous voulons pour ce faire utiliser un programme *in situ*, c'est-à-dire n'utilisant aucune autre variable que A, B et C , et bien sûr nous voulons qu'il fonctionne pour tout jeu de données.

Permutation circulaire de trois valeurs

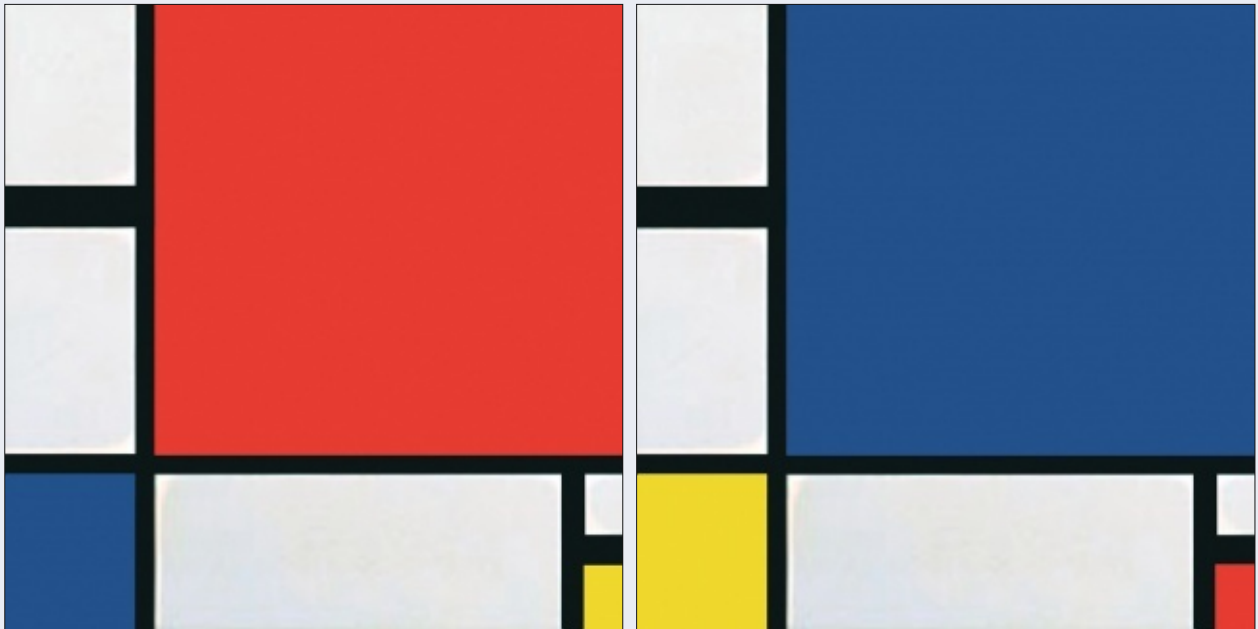
En voici un, avec le détail de l'état de chacune des variables lors du calcul :

	A	B	C
	3	50	700
$A := A + B$	53	50	700
$B := B + C$	53	750	700
$C := A - B + C$	53	750	3
$B := B - A + C$	53	700	3
$A := A - C$	50	700	3

En remplaçant les $+$ et les $-$ par des xor , on obtient, comme précédemment, un programme pour variables booléennes. Une autre méthode aurait consisté à échanger les valeurs de A et B , puis à échanger les valeurs de B et C en utilisant deux fois la méthode vue précédemment. Cela aurait nécessité six affectations alors que notre proposition n'en utilise que cinq. Peut-on faire mieux que cinq affectations ? La solution est donnée dans l'encadré ci-contre.

Expliquons maintenant avec plus de détails ce que les chercheurs dénomment calcul *in situ*. Un ensemble fini S est donné

1. La permutation circulaire



La question posée est : quel est le minimum d'affectations dont on a besoin dans un calcul *in situ* pour échanger circulairement les contenus de trois variables A, B, C , (A, B, C) devenant (B, C, A) ? Dans le tableau de Mondrian et son faux, trois couleurs ont été ainsi permutées. Petit exercice : quel est le vrai, quel est le faux ?

Notons d'abord que trois affectations ne suffiront pas. Il faudrait en effet, dès la première affectation, placer une bonne valeur là où on fait l'affectation, ce qui ferait disparaître la valeur qui y est stockée, dès lors irrécupérable.

En revanche, réaliser la permutation circulaire avec quatre affectations est possible, donc 4 est le nombre minimum d'affectations nécessaires à la permutation circulaire de trois nombres. Voici la solution en quatre affectations :

	A	B	C
Au départ	A	B	C
$A := A + B + C$	A+B+C	B	C
$C := A - B - C$	A+B+C	B	A
$B := A - B - C$	A+B+C	C	A
$A := A - B - C$	B	C	A

Le procédé se généralise pour opérer une permutation circulaire entre n mémoires, c'est-à-dire pour passer de $(A_1 A_2 A_3 \dots A_{n-1} A_n)$ à $(A_2 A_3 \dots A_{n-1} A_n A_1)$.

À la première étape, on place dans A_1 la somme $A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_{n-1} + A_n$, puis, à chaque

étape, toutes les valeurs initiales des variables sont présentes dans $A_2, A_3, \dots, A_{n-1}, A_n$ sauf une, ce qui permet, grâce à A_1 , de la placer au bon endroit.

	A_1	A_2	A_3	...	A_{n-1}	A_n
Au départ	A_1	A_2	A_3	...	A_{n-1}	A_n
$A_1 := A_1 + A_2 + \dots + A_n$	$A_1 + A_2 + \dots + A_n$	A_2	A_3	...	A_{n-1}	A_n
$A_n := A_1 - A_2 - \dots - A_n$	$A_1 + A_2 + \dots + A_n$	A_2	A_3	...	A_{n-1}	A_n
$A_{n-1} := A_1 - A_2 - \dots - A_n$	$A_1 + A_2 + \dots + A_n$	A_2	A_3	...	A_{n-1}	A_n
...	...	...	...	...	...	...
$A_2 := A_1 - A_2 - \dots - A_n$	$A_1 + A_2 + \dots + A_n$	A_2	A_3	...	A_{n-1}	A_n

L'affectation opérée pour A_n place donc bien la valeur initiale de A_1 en A_n , puis l'affectation opérée pour A_{n-1} place donc bien la valeur initiale de A_2 en A_{n-1} , etc. Le calcul est présenté avec des + et des -, et fonctionne avec des nombres entiers, réels ou même complexes.

Le calcul s'adapte aussi avec des nombres calculés modulo k , ou aux variables booléennes (en remplaçant les + et les - par *xor*, ce qui correspond d'ailleurs au + quand on calcule modulo 2). Cette remarque est importante car elle permet de répondre à une objection naturelle, mais essentielle, à la méthode proposée pour opérer une permutation circulaire de n entiers.

Voici l'objection : quand on calcule avec des entiers, la méthode de calcul *in situ* proposée triche, car elle stocke dans A_1 la somme des

valeurs de toutes les variables, ce qui exige un espace mémoire plus grand pour la variable A_1 ; s'il y a par exemple 10 variables variant entre 0 et 10, il faut pour stocker A_1 une variable capable de recevoir toutes les valeurs entre 0 et 100.

Voici la réponse à l'objection. Oui, cela est vrai pour la méthode avec des + et des -, c'est-à-dire avec les opérations arithmétiques habituelles entre nombres entiers. Cependant, puisqu'on peut mener un calcul modulo k (où k est un entier fixé), on dispose dans ce cas d'une méthode qui n'utilise pas plus d'espace pour A_1 .

Une autre idée pour répondre à l'objection consiste à écrire les nombres entiers en base 2 et, au lieu de faire des additions ou des soustractions entre deux nombres X et Y , on calcule le nombre dont les chiffres binaires sont ceux obtenus en faisant le *xor* entre les chiffres binaires de X et de Y (exemple $1001 \text{ xor } 0111 = 1110$, autrement dit, $9 \text{ xor } 7 = 14$) et l'on retombe bien sur ses pieds à la fin.

L'espace nécessaire pour stocker A_1 reste encore identique à celui nécessaire pour stocker chaque nombre (p chiffres binaires par exemple si on manipule des nombres de p chiffres binaires). Les procédés décrits (traduits avec des calculs modulo k ou des *xor*) réalisent donc un calcul *in situ* sans avoir à considérer un espace mémoire particulier pour A_1 .

L'AUTEUR



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

qui peut être un ensemble de nombres, ou de lettres ou de codes numériques chargés de représenter informatiquement des objets réels. On se donne aussi un nombre entier n et une application F de S^n dans S^n , c'est-à-dire une transformation qui à tout n -uplet d'éléments de S en associe un autre. Dans l'exemple de la permutation circulaire, l'application F de S^3 dans S^3 est celle qui, à tout triplet de valeurs (A, B, C) , associe (B, C, A) .

Calcul *in situ* général

Quand on considère des variables booléennes, cela signifie que chaque élément de S est 0 ou 1. En plus du cas booléen, nous envisagerons deux autres cas finis. Si nous calculons avec des nombres entiers écrits en binaire avec k chiffres alors les éléments de S sont $0, 1, 2, \dots, 2^k - 1$; si nous calculons modulo p (nous remplaçons chaque nombre par son reste lors de la division par p), les éléments de S sont $0, 1, \dots, p - 1$.

Dans le cas général, un calcul *in situ* pour une application F est une suite d'affectations analogues à celles que nous avons utilisées

dans les exemples. Ces affectations sont envisagées une à une et chacune attribue une valeur nouvelle à l'une des variables dont l'ancienne valeur est donc perdue... c'est tout le problème ! La valeur nouvelle ne dépend que des valeurs disponibles à cet instant du calcul et nous nous imposons, dans le calcul *in situ*, de n'utiliser aucune variable supplémentaire.

Pour la permutation circulaire de n variables proposée dans l'encadré 1, nous considérons l'opération :

$$F: (A_1, A_2, \dots, A_n) \rightarrow (A_2, \dots, A_n, A_1).$$

La méthode proposée montre que $n + 1$ affectations suffisent pour réaliser cette permutation circulaire, sans que nous n'utilisions aucune autre variable que celles données, et sans que nous ayons à stocker dans les variables des nombres plus grands que $2^k - 1$ dans le cas des nombres en binaire, ou que $p - 1$ dans le cas du calcul modulo p . L'encadré 2 explique que lorsqu'on se donne des variables où l'on peut mémoriser des entiers sans limitation de taille (ce qui est irréaliste en informatique), alors toute affectation F de S^n dans S^n se calcule *in situ* en au plus $n + 1$ affectations.

Cette valeur de $n + 1$, valable pour les permutations circulaires de n variables et pour les transformations F quelconques quand nous utilisons des variables non bornées, n'est pas générale. Pour la transformation $F(A_1, A_2, A_3, A_4) = (A_2, A_1, A_4, A_3)$, on ne sait pas faire mieux que six affectations pour un calcul *in situ* avec des variables bornées.

Les programmes *in situ*, surtout s'ils sont courts, devraient aider à concevoir des puces électroniques moins gourmandes en mémoire, ce qui augmentera la rapidité du calcul. En effet, calculer «localement» est souvent plus efficace pour un processeur que de faire des requêtes aux mémoires externes qu'on doit associer à l'utilisation de variables auxiliaires.

Cette économie de mémoire entraîne un allongement de la taille des programmes. C'est là un nouvel exemple d'une règle générale rencontrée en maintes occasions en informatique : pour économiser de la mémoire, il faut parfois complexifier le calcul. Les algorithmes de compression

2. Calcul *in situ* dans le cas infini

Au départ, nous avons un n -uplet : $(A_1, A_2, \dots, A_n)$. Les variables $A_1, A_2, \dots, A_n$, sont choisies dans un ensemble S non borné, par exemple l'ensemble des entiers.

Une application F attribue de nouvelles valeurs aux variables $A_1, A_2, \dots, A_n$ qui deviennent $B_1, B_2, \dots, B_n$.

Utilisons des variables où nous pouvons mémoriser des entiers sans limitation de taille et voyons comment il a été démontré, dans ce cas particulier, que toute application F peut se calculer *in situ* en au plus $n + 1$ affectations. Pour que le calcul soit *in situ*, nous devons tenir compte du fait que lorsque nous mettons une valeur dans A_i , celle-ci écrasera l'ancienne valeur dès lors indisponible. Pas question donc d'écrire un programme du type :

$$A_1 := E_1(A_1, A_2, \dots, A_n), A_2 := E_2(A_1, A_2, \dots, A_n), \dots, A_n := E_n(A_1, A_2, \dots, A_n).$$

L'idée du calcul est de remplacer A_1 par $A' = 2^{A_1} 3^{A_2} \dots p_n^{A_n}$, où la suite p_i désigne la suite des nombres premiers $(2, 3, 5, 7, \dots)$. Cette étape réunit dans A_1 toute l'information contenue dans les variables $A_1, A_2, \dots, A_n$. Pour récupérer A_i à partir de A' , on calculera le nombre de fois que A' est divisible par p_i . Le fait de placer B_2 dans la variable A_2 ne fait pas perdre l'information A_2 , car celle-ci reste présente, mêlée aux autres valeurs dans A' . On peut alors calculer tous les nouveaux A_i en récupérant toutes les valeurs des anciens A_i dans A' , puis en utilisant l'application adéquate. À l'étape $n + 1$, on calcule A_1 en fonction de A' .

Comme nous avons regroupé et codé (avec la décomposition en facteurs premiers) toutes les valeurs de $A_1, A_2, \dots, A_n$ dans A' , nous n'avons pas besoin de mémoire supplémentaire et nous gardons à portée de main durant le calcul toutes les valeurs initiales des variables mises «au chaud». Bien sûr, cette astuce ne fonctionne pas en informatique où chaque variable ne peut prendre qu'un nombre fini de valeurs.

de données fonctionnent aussi selon cette maxime : en calculant les versions compressées d'images, de musiques ou de vidéos que nous voulons conserver, nous économisons de l'espace. Aujourd'hui, mener des calculs est devenu plus facile et l'algorithmique *in situ* est appelée à se développer et à intervenir au plus profond des puces électroniques. Un brevet a été déposé dans cette optique par les chercheurs du domaine.

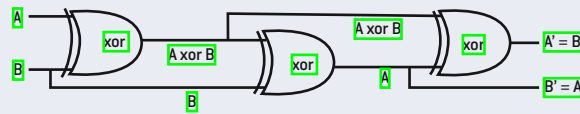
Serge Burckel, aujourd'hui enseignant à l'Université de La Réunion, est l'initiateur des travaux de recherche sur l'algorithmique *in situ* et l'un des principaux auteurs des découvertes sur le sujet. Il pense que le principe du calcul *in situ* a également un sens physique.

L'information est conservée

Pour S. Burckel, l'importance des calculs *in situ* provient de ce que tout système physique isolé qui se modifie mène une sorte de calcul *in situ*. Le fait d'être isolé impose qu'aucune information n'est copiée à l'extérieur du système durant sa transformation. C'est donc que les variables internes qui le décrivent gèrent l'évolution du système d'étape en étape sans que rien d'autre ne soit utilisé. Les lois de la physique ont probablement des formes particulières qui autorisent cela et même qui facilitent l'obtention de ces calculs *in situ*. Comprendre ce qui est faisable par des algorithmes sans mémoire est donc important non seulement pour les applications qu'on devrait en tirer dans la conception des programmes et des puces électroniques, mais aussi pour saisir les principes généraux de la physique.

S. Burckel explique que lorsqu'il a commencé à étudier cette algorithmique de l'économie de mémoire, il a cherché à identifier les transformations d'une suite de n variables booléennes calculables par un programme *in situ*. Prenant des transformations de ce type au hasard, il a découvert, à sa grande surprise, que chacune d'elles se laissait programmer *in situ*. Ce succès sur des exemples était certainement la conséquence d'un

3. Calculer sans croiser de fils



Le croisement de deux fils où circulent des informations est impossible si l'on interdit à un fil de passer sur l'autre (si deux fils se touchent, les informations vont se mélanger). L'utilisation de trois portes logiques *xor* permet l'équivalent d'un croisement de fils. On exploite la permutation *in situ* en trois affectations :

$A := A \text{ xor } B, B := [(A \text{ xor } B) \text{ xor } B] = A; A := [(A \text{ xor } B) \text{ xor } A] = B.$

Plus généralement, si des informations arrivent sur n fils dans un certain ordre et doivent repartir dans un autre (c'est-à-dire une permutation quelconque de n fils, ce que l'on désigne parfois sous le nom de tresse) sans aucun croisement de fils, la programmation *in situ* de la permutation de variables donnera une solution utilisant au plus $3n/2$ portes logiques *xor*.

théorème général qu'il a fini par obtenir : toute transformation de l'ensemble $\{0, 1\}^n$ (les n -uplets de 0 et de 1) dans lui-même se programme *in situ*.

Une longue quête a alors commencé pour, selon les différents types de transformations, élaborer les meilleures listes d'affectations possibles constituant les programmes *in situ*. Nous allons présenter quelques-uns des résultats obtenus.

Les meilleurs résultats connus

Après les permutations circulaires de variables, les transformations les plus simples sont les permutations quelconques de variables, par exemple :

$(A, B, C, D, E) \rightarrow (B, E, D, C, A)$. Un peu d'attention montre que la transformation se décompose en 2 cycles : $A \rightarrow B \rightarrow E \rightarrow A$ et $C \rightarrow D \rightarrow C$.

Autrement dit, on est ramené à deux permutations circulaires, l'une portant sur trois éléments, l'autre sur deux. Puisque chacune se décompose en suites d'affectations (respectivement quatre et trois affectations), ce sera le cas de la transformation qui réunit les deux cycles. Elle pourra donc être obtenue *in situ* en sept affectations.

Nous savons depuis des siècles que toute permutation se décompose en cycles. La méthode de décomposition proposée pour notre exemple se généralise donc sans difficulté : toute permutation possède un programme *in situ*.

BIBLIOGRAPHIE

S. Burckel, E. Gioan et E. Thomé, Mapping computation with no memory, dans *Unconventional Computation, 8th International Conference Proceedings*, Lecture Notes in Computer Science n° 5715, pp. 85-97, Springer, 2009.

S. Burckel et E. Gioan, *In situ design of register operations*, *Proceedings of ISVLSI 2008*, IEEE Computer Society Annual Symposium on Very-Large-Scale Integration, 2008.

S. Burckel et M. Morillon, *Quadratic sequential computations*, *Theory of Computing Systems*, vol. 37(4), pp. 519-525, 2004.

S. Burckel et M. Morillon, *Sequential computation of linear boolean mappings*, *Theoretical Computer Science*, vol. 314, pp. 287-292, 2004.

S. Burckel, *Closed iterative calculus*, *Theoretical Computer Science*, vol. 158, pp. 371-378, 1996.

4. Nouvelle décomposition de matrices pour le calcul *in situ*

La décomposition d'une application linéaire F en série d'affectations pour en tirer un programme *in situ* est toujours possible en $2n-1$ étapes, ce qui est très peu.

La lecture de ces $2n-1$ affectations (toutes linéaires aussi) s'interprète comme la décomposition de la matrice de départ en un produit de matrices simples : chacune est obtenue en modifiant une unique ligne à la matrice identité. C'est là un nouveau type de décomposition d'une matrice en produit de matrices simples.

Donnons un exemple avec un calcul modulo 2.

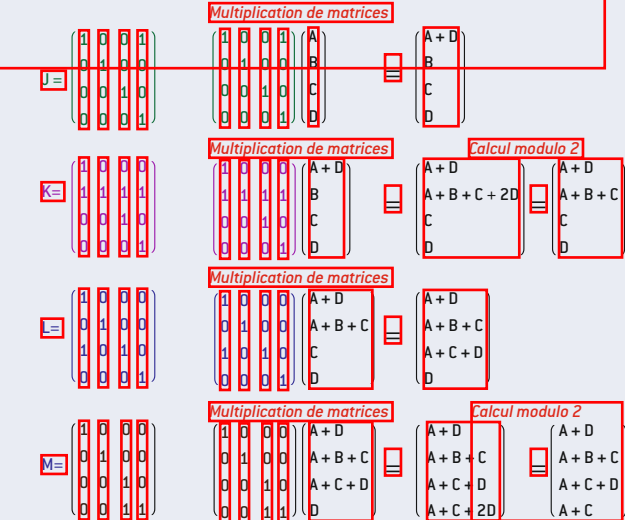
Nous voulons aboutir à l'affectation finale :

$$F(A, B, C, D) = (A + D, A + B + C, A + C + D, A + C).$$

Comme toute application linéaire, on peut l'écrire sous la forme du produit d'une matrice et d'un vecteur colonne.

$$F = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A + D \\ A + B + C \\ A + C + D \\ A + C \end{pmatrix}$$

L'application est définie par le vecteur colonne indiqué. Toutefois, le calcul ne peut se faire *in situ* d'un seul coup car, dès que l'on a remplacé A par $A + D$, il faut réaménager le calcul en fonction de cette nouvelle valeur de A , et ainsi de suite pour toutes les variables. Cela peut se faire en utili-



sant des pseudomatrices unités où une seule ligne est transformée. Ainsi, la matrice F de la transformation est décomposée en un produit des matrices J, K, L et M , explicitées ci-dessus. On obtient avec ces matrices : $F(A, B, C, D) = M L K J (A, B, C, D) = (A + D, A + B + C, A + C + D, A + C)$.

Puisqu'il faut $n + 1$ affectations pour une permutation circulaire entre n variables, il faut dans le pire cas (quand tous les cycles sont des cycles d'ordre 2) $3n/2$ affectations si n est pair, et $(3n - 1)/2$ affectations si n est impair. Dans le cas d'une permutation se décomposant en k cycles non réduits à un point, $c_1, c_2, \dots, c_k$ de longueurs $|c_1|, |c_2|, \dots, |c_k|$, le programme *in situ*, résultat de l'idée indiquée au-dessus, est composé de $k + |c_1| + |c_2| + \dots + |c_k|$ affectations. Ce nombre est le meilleur qu'on puisse obtenir. La décomposition d'une permutation quelconque de variables en un programme *in situ* de $3n/2$ opérations au plus permet d'échanger de l'information entre n fils qui ne peuvent pas se croiser (car placés sur un même plan), en utilisant $3n/2$ portes logiques *xor* au plus (voir l'encadré 3).

D'autres résultats ont été obtenus pour les applications linéaires. Tout d'abord sur des variables booléennes et plus généralement modulo p avec p premier (S. Burckel et Marianne Morillon) et par la suite sur des entiers modulo k , pour tout entier k fixé (Emmanuel Thomé). Un exemple est donné dans l'encadré ci-dessus.

Les résultats obtenus indiquent que toute transformation linéaire peut s'obtenir par un programme *in situ* comportant au plus $2n - 1$ affectations, chacune correspondant à une opération elle-même linéaire (comme dans l'exemple). De plus, on peut imposer l'ordre dans lequel se feront les affectations : 1, 2, ..., n , $n - 1$, ..., 2, 1 (affectation de la première variable, de la deuxième, etc.).

Trouver le simple est compliqué

Toute transformation n'est pas linéaire, aussi fallait-il étudier le cas général. Dans un premier temps, il a été établi que toutes les transformations bijectives (linéaires ou non) F de S^n dans S^n possédaient des programmes *in situ* et que $2n - 1$ affectations suffisent. S. Burckel et Emeric Gioan ont ensuite montré que $5n - 4$ affectations suffisent toujours, quelle que soit la complexité de F et cela même quand F n'est pas bijective. Lorsque le nombre d'éléments de S est une puissance de 2, on peut même descendre jusqu'à $4n - 3$.

Ces résultats récents améliorent un résultat précédent obtenu par S. Burckel et M. Morillon qui indiquait que n^2 affecta-

tions suffisaient dans le cas booléen. Le gain de n^2 à $4n - 3$ est considérable. Malheureusement, le calcul des décompositions est parfois très difficile et lorsque le nombre de variables est grand, on risque de se heurter à une impossibilité pratique. Autrement dit : la complexité des algorithmes pour calculer les décompositions les plus simples est grande. On a là, une fois encore, une illustration de la maxime « Trouver le simple est compliqué ».

Ces résultats ne donnent pas nécessairement les décompositions optimales, qui sont encore plus difficiles à trouver. Les explorations exhaustives sont en théorie envisageables, puisque nous sommes dans un cas fini. Elles garantissent de trouver les programmes *in situ* optimaux, mais elles sont si coûteuses en calcul qu'on ne peut les envisager que si n est vraiment petit (inférieur à 10). De nombreux résultats sont donc encore attendus dans ce domaine à la fois combinatoire, algébrique et algorithmique. Il est à parier qu'à mesure des perfectionnements apportés aux méthodes pratiques pour calculer les décompositions en programmes *in situ*, leur intérêt concret apparaîtra et leur utilisation se généralisera.

Rendez-vous sur www.pourlascience.fr

■ Retrouvez gratuitement les actualités scientifiques quotidiennes.

■ Recevez nos lettres d'information et réagissez aux articles en vous inscrivant sur le site.

■ Recherchez et commandez les archives parues depuis 2004 de *Pour la Science* et des *Dossiers Pour la Science*.

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



À très bientôt sur www.pourlascience.fr !

POUR LA
SCIENCE.fr

Le site de référence de l'actualité scientifique

ART & SCIENCE

L'erreur de Léonard de Vinci

Un polyèdre à 26 faces, le rhombicuboctaèdre, a défié Léonard de Vinci et un autre peintre de la fin du XV^e siècle, qui ont voulu le représenter. Les deux se sont trompés.

Loïc MANGIN

En 1496, le moine et mathématicien italien Luca Pacioli (1445-1517) arrive à Milan, invité par la puissance locale, le duc Ludovico Sforza (1452-1508). Là, il rencontre Léonard de Vinci (1452-1519) à qui il enseigne les mathématiques. Une solide amitié lie les deux hommes, au point qu'ils partiront ensemble vers Mantoue, en 1499, à la chute de leur protecteur, destitué par les troupes du roi de France Louis XII.

À Milan, Pacioli écrit son grand œuvre *De divina proportione*, publié à Venise en 1509 et dont on connaît trois exemplaires : le premier, dédié à Ludovico, est conservé à Genève, le deuxième est à Milan, le troisième a disparu. Les planches gravées sont de Léonard de Vinci. Dans la première partie de l'ouvrage, *Compendio de divina proportione*, traitant du nombre d'or, on trouve la représentation de 60 types de polyèdres. Le mathématicien et artiste néerlandais Rinus Roelofs s'est récemment intéressé à l'un d'eux et y a découvert une erreur, que le mathématicien belge Dirk Huylebrouck a contribué à rendre publique.

Le polyèdre en question est le rhombicuboctaèdre (voir la figure a, un dessin de Léonard de Vinci qui apparaît dans *De divina proportione*). Il s'agit d'un solide d'Archimède – les faces ne sont pas nécessairement identiques – constitué de 8 faces triangulaires et de 18 faces carrées. En chacun de ses 24 sommets se rencontrent un triangle et trois carrés, et un triangle est toujours entouré de carrés. En outre, le polyèdre est doté d'une symétrie octaédrique, comme le cube. On le nomme *rhombicuboctaèdre*, car 12 de ses faces carrées sont

placées dans les mêmes plans que les 12 faces (en losange) du dodécaèdre rhombique qui est le dual du cuboctaèdre (huit faces triangulaires et six faces carrées). Rappelons que les sommets du dual d'un polyèdre correspondent aux centres des faces de ce dernier.

A partir de ce polyèdre, on peut en construire un autre, dérivé, en érigeant à partir de chaque face une pyramide qui a donc, outre sa base, trois ou quatre faces. C'est un tel objet qu'a représenté Léonard de Vinci sur une de ses planches de *De divina proportione* (voir la figure d). Un examen attentif révèle

**La pyramide
la plus basse devrait
avoir trois faces visibles
et non quatre.**

l'erreur : la pyramide la plus basse du dessin devrait être à trois faces visibles, et non pas quatre (d, flèche rouge). Un modèle informatique (voir la figure e) et une sculpture de R. Roelofs (voir la figure f, insérée dans la planche originale) confirment le diagnostic. D'autres pyramides (indiquées par des flèches noires) ne semblent pas conformes, mais le doute demeure.

À sa décharge, Léonard de Vinci, qui fut le premier à représenter un tel édifice géométrique, n'avait à sa disposition que les instructions de son ami Pacioli. Il n'avait sans doute pas de modèle, du moins n'en connaît-on aucune trace.

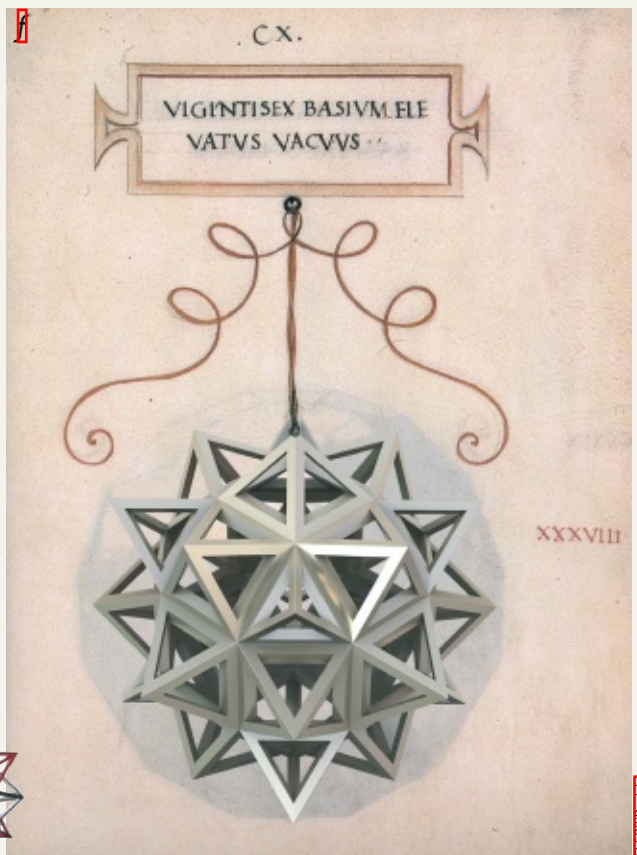
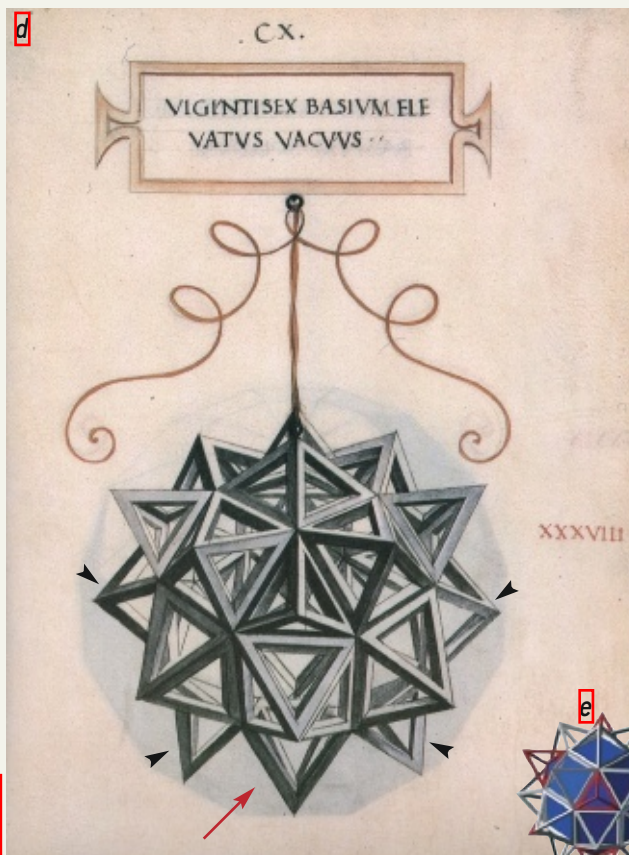
Aucun modèle ? Pourtant, sur le portrait de Luca Pacioli attribué au peintre Jacopo

de' Barbari, le solide suspendu à droite est bien un rhombicuboctaèdre (voir la figure c) ! Regardons de plus près ce tableau, daté de 1495 et dont la paternité est contestée. Pacioli, habillé en franciscain, illustre sur une ardoise marquée « Euclide » un théorème de ce dernier. Sa main gauche est sur les *Éléments* d'Euclide, ouverts au niveau du livre XIII. À droite, sur la table, un dodécaèdre en bois est posé sur un livre, probablement la *Summa de arithmetica, geometria, proportioni et proportionalita* que Pacioli a publiée en 1494, à Venise. L'identité de l'homme, au second plan, est incertaine : certains reconnaissent Guidobaldo 1^{er} de Montefeltro, 3^e duc d'Urbino, d'autres Albrecht Dürer.

Le rhombicuboctaèdre semble être en verre et devait donc être lourd, d'autant plus qu'il est à moitié plein d'eau. Comment un tel récipient pouvait-il être suspendu par un fil si fin ? Des artisans de cette époque étaient-ils capables de fabriquer des joints étanches pour un objet aussi complexe ? Ces questions jettent le doute sur la réalité de ce modèle. Autre indice, plus probant : le rendu du fil sur la toile, et notamment sa réfraction à travers l'eau et le verre, n'est pas réaliste, la version moderne du rhombicuboctaèdre en attestant (voir la figure b) : le fil devrait paraître coupé, à l'inverse de ce que l'on voit sur le tableau.

Ainsi, tant Barbari que Vinci ont dessiné le rhombicuboctaèdre sans modèle. Rendons-leur justice, pour un solide à 26 faces, c'est plutôt réussi !

D. Huylebrouck, *Een fout van Leonardo da Vinci*, EOS, avril 2011.



IDÉES DE PHYSIQUE

Vitesse de la lumière et four à micro-ondes

Contrairement à ce que d'aucuns affirment, la visualisation des ondes stationnaires dans un four à micro-ondes ne permet pas de mesurer facilement la vitesse de la lumière.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

De nombreux sites Internet francophones ou anglophones proposent de réaliser une expérience sympathique et éclairante avec un four à micro-ondes : visualiser la figure des ondes stationnaires formées dans le four par les ondes électromagnétiques et en mesurer la longueur d'onde, pour en déduire la valeur de la vitesse de la lumière. Cette proposition séduisante repose hélas sur des idées trop simplistes. Il est en effet bien difficile de dépasser le stade qualitatif, en raison de la nature tridimensionnelle des ondes stationnaires – même si, par chance, il arrive parfois que le résultat numérique obtenu ne s'écarte que de quelques pourcents de la valeur attendue...

L'expérience est rapide et facile à faire. Son résultat étonnera petits et grands qui auront passé ensemble un agréable moment en cuisine. Voici la procédure à suivre (en présence d'un adulte). D'abord, retirez le plateau tournant de votre four à micro-ondes et prévoyez quatre cales en carton sur lesquelles reposera une feuille de carton rectangulaire rigide légèrement plus petite que le four.

Disposez sur cette feuille une tablette de chocolat, ou des marshmallow, ou du blanc d'œuf... Les recettes que l'on peut trouver sont fort variées ; il suffit d'utiliser une substance contenant de l'eau et dont l'échauffement provoque une transformation visible. En ce qui nous concerne, afin de répéter l'expérience facilement et pour un coût modeste, nous avons opté pour de l'emmental râpé, que l'on saupoudre sur la feuille de papier ou de carton (voir la figure 1). Lorsque le fromage fond, la matière

grasse qui suinte imbibé le papier, ce qui facilite la visualisation.

Enfin, mettez en route le four et surveillez ce qui se passe par la fenêtre du four ou en ouvrant régulièrement la porte. Pour le gruyère râpé, un chauffage de 30 secondes semble convenir. Vous observerez alors que l'échauffement par les micro-ondes ne se produit qu'à certains endroits, et que la distance caractéristique entre deux endroits fondus (ou cuits) est de l'ordre de quelques centimètres (voir la figure 2).

Expérience simple, explication simpliste

Comment interpréter cette expérience ? Les parois métalliques intérieures sont, pour les micro-ondes produites par le four, comme des miroirs sur lesquels ces ondes

se réfléchissent. Quelle est la résultante de la superposition de toutes les ondes se propageant dans la cavité du four ? La situation est analogue à celle d'une corde vibrante, où l'onde qui se propage dans une direction interfère avec l'onde qui se propage dans la direction opposée.

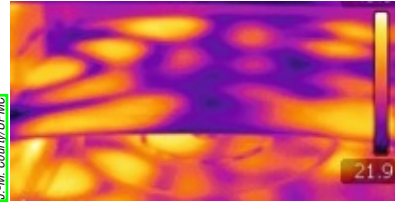
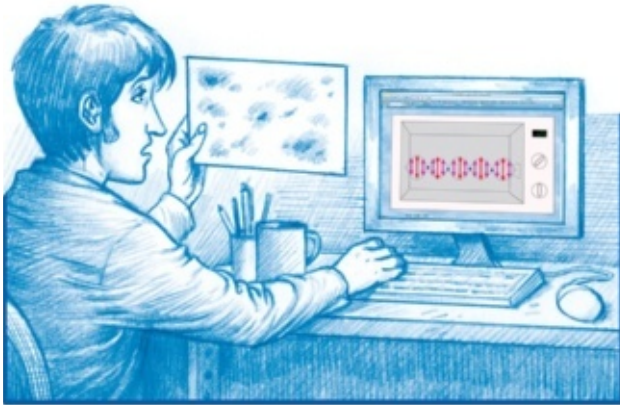
Si la fréquence de ces ondes est appropriée, il y a résonance et la corde exhibe le profil caractéristique d'une onde stationnaire : en certains points, les « ventres », la corde vibre avec une amplitude maximale, tandis qu'à d'autres, les « nœuds », elle est immobile (voir la figure 2). Dans cette situation unidimensionnelle, la distance entre deux ventres ou deux nœuds successifs est égale à une demi-longueur d'onde, tandis que la longueur totale de la corde est égale à un nombre entier de demi-longueurs d'onde.

Il est alors tentant de faire brutalement l'analogie entre corde vibrante et four à micro-ondes, l'amplitude de la vibration de la corde correspondant à l'amplitude d'oscillation du champ électrique de l'onde électromagnétique. Là où elle est maximale (les ventres), le fromage, qui contient un peu d'eau, est davantage chauffé, ce qui fait fondre en premier la matière grasse présente à cet endroit. En mesurant la distance entre deux zones fondues et en multipliant par deux, on obtient la longueur d'onde.

Connaissant la fréquence des ondes créées par le four (2,45 gigahertz), on en déduit la vitesse de la lumière par une simple multiplication (la vitesse d'une onde est égale au produit de sa longueur d'onde par sa fréquence) : ainsi, lorsqu'on mesure une distance de six centimètres, on trouve une vitesse de 294 000 kilomètres par seconde,



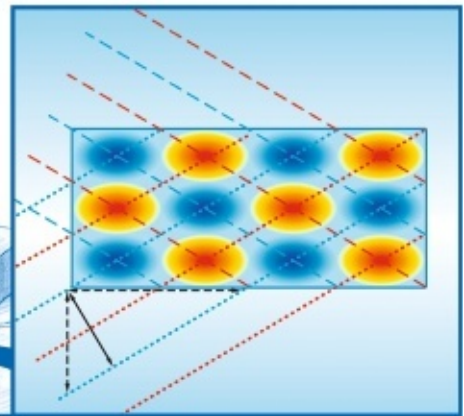
1. CECI N'EST PAS UNE RECETTE... de cuisine, mais de physique : commencez par saupoudrer du gruyère râpé sur une feuille de carton rigide qui reposera dans le four à micro-ondes sur quatre cales de carton. Puis...



2. LÀ OÙ LE FOUR A LE PLUS CHAUFFÉ, le gruyère a fondu et laissé des taches de gras. Mais la disposition des taches ne correspond pas du tout à ce qu'indiquent certains sites Internet, qui interprètent l'expérience sur la base d'une onde stationnaire établie selon une seule dimension du four. La répartition peu régulière des zones d'échauffement maximal dans un four est confirmée par le cliché pris avec une caméra à infrarouges (ci-dessus, avec la feuille surélevée dans le four).

résultat assez proche de la valeur correcte (environ 300 000 kilomètres par seconde).

C'est toutefois oublier que la cavité résonnante formée par l'intérieur d'un four à micro-ondes est un volume parallélépipédique à trois dimensions. Il est peu probable que l'onde électromagnétique y forme une onde stationnaire sur une seule des dimensions.



Des ondes 3D, pas 1D

Analysons ce qui se passe dans une section horizontale du four, de forme rectangulaire. Le champ électrique dans les fours à micro-ondes est vertical. Or, au niveau d'une surface conductrice, la composante du champ électrique parallèle à la surface s'annule. Il s'ensuit que le champ électrique est nul sur tout le périmètre du rectangle, lequel constitue donc une ligne nodale (chacun de ses points est un nœud).

Cela suggère que pour un mode résonnant donné, les lignes nodales forment un réseau régulier dans le rectangle et sans doute dans tout le volume. La difficulté est alors de savoir comment relier les trois dimensions du réseau (sa périodicité selon la longueur, la profondeur et la hauteur du four) à la longueur d'onde du rayonnement. Dans le cas d'un four parfaitement parallélépipédique, le calcul – confirmé par les observations des physiciens – montre que la relation entre la vitesse de la lumière, la fréquence de l'onde et la structure spatiale du mode fait intervenir la somme des carrés des inverses des périodes spatiales du réseau.

En pratique, dans un four de cuisine, la situation est plus complexe : les parois

3. EN LABORATOIRE, UN PHYSICIEN PEUT RÉALISER L'EXPÉRIENCE avec précision en utilisant une cavité métallique bien dimensionnée et parfaitement parallélépipédique. L'onde stationnaire à deux dimensions qui se forme dans une section horizontale de la cavité est la superposition de deux ondes stationnaires à une dimension, inclinées par rapport à l'axe du rectangle (une onde est représentée par des lignes pointillées, l'autre par des lignes à petits tirets ; le rouge indique l'amplitude maximale, le bleu foncé l'amplitude opposée). La longueur d'onde de la micro-onde est celle de ces ondes unidimensionnelles. Géométriquement, elle correspond à la hauteur d'un triangle rectangle dont les deux côtés (pointillés noirs) correspondent aux périodes spatiales mesurées sur le motif bidimensionnel.

du four présentent des irrégularités dues à la présence d'une lampe, d'ouvertures pour la ventilation, etc. Les objets présents dans le four pour réaliser l'expérience sont aussi des sources d'absorption ou de déviation des ondes.

En outre, plusieurs modes de résonance peuvent être excités, chacun avec sa propre structure spatiale : avec un four mesurant $29 \times 29 \times 19$ centimètres cubes, on en dénombre six, dont quatre présentent une, deux ou trois lignes nodales (en plus des parois) sur chacune des directions horizontales, lignes qui délimitent autant de zones de ventres. Si tous ces modes sont simultanément présents, dans des proportions

LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>

✓ BIBLIOGRAPHIE

J.-M. Courty et E. Kierlik,
À la chaleur des micro-ondes,
Pour la Science, n° 348,
octobre 2006 (reproduit
dans La physique buissonnière,
Belin-Pour la Science, 2010).

M. Vollmer, Physics
of the microwave oven,
Physics Education,
vol. 39, pp. 74-81, 2004.

Retrouvez les articles de
J.-M. Courty et E. Kierlik sur
www.pourlascience.fr

variées, aucune structure spatiale simple ne sera visualisée par les parties fondues et il sera très délicat d'estimer la vitesse de la lumière.

Des coïncidences

Comme on peut le constater sur les photos présentées sur les divers sites Web, il arrive cependant que deux maxima soient séparés de la distance prévue par la théorie (fausse) unidimensionnelle. Dans ce cas, la mesure sera considérée comme une réussite et la personne qui l'a réalisée s'empressera de mettre la photo et le résultat sur son blog !

Cette configuration s'est produite plusieurs fois lors de nos expériences. En effet, dans certaines conditions, notamment en fonction de la quantité de gruylère,

nous avons observé deux bandes parallèles à la paroi du four selon la largeur, situation qui ressemble à celle d'une onde à une dimension.

En revanche, lorsque la valeur mesurée n'est pas celle attendue, l'échec est mis sur le compte d'un raté de l'expérience, d'une mauvaise manipulation ou d'une erreur de mesure. C'est ce qui s'est passé pour tous les collègues ayant tenté l'expérience avec qui nous avons discuté, et pour nous-mêmes avant que nous nous soyons rendu compte des insuffisances de l'analogie unidimensionnelle. Évidemment, dans de tels cas, on n'est pas tenté de poster un billet sur le Web pour dire que cela n'a pas marché... Pour en avoir le cœur net, nous vous invitons à poster les résultats (photos, chiffres...) de vos expérimentations sur notre blog. Tous en cuisine !

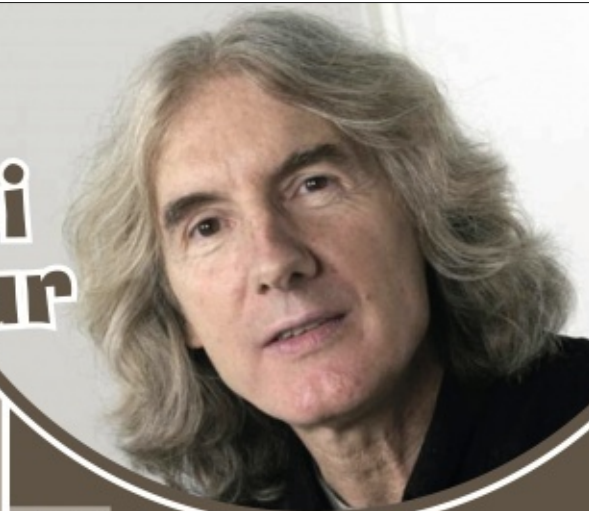
Mardi 28 juin 2011 à 18h30
au Palais de la découverte
Avenue F.-D. Roosevelt • 75008 Paris

Raconte-moi un chercheur

Pour la Science, en partenariat avec le Palais de la découverte, vous convie, chaque mois, à passer une heure avec un scientifique.

Comment est-il devenu chercheur ? Quelles sont les différentes facettes de son métier ? En quoi consiste son travail au quotidien ?

En vous faisant partager leur expérience et en rendant leur métier plus concret, ces chercheurs ont une ambition : vous communiquer leur passion pour la science !



Invité

Jean-Marc Bonnet-Bidaud

Astrophysicien au CEA (Commissariat à l'énergie atomique), à Saclay, Jean-Marc Bonnet-Bidaud travaille au sein du Service d'astrophysique (SAP) de l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu), dans l'Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7-CNRS). Passionné d'astronomie chinoise, il a récemment analysé et daté le plus ancien atlas du ciel étoilé connu à ce jour, l'atlas chinois de Dunhuang.



un lieu universcience
www.universcience.fr



www.pourlascience.fr

La sélection **POUR LA SCIENCE**

Spécial évolution



La Terre avant les dinosaures

Sébastien Steyer,
illustré par Alain Bénateau

Ce livre répare une injustice ! Il braque l'objectif sur de grands oubliés de la paléontologie : des vertébrés à quatre pattes qui, bien avant le règne des dinosaures, peuplaient notre planète. Retrouvez-les dans cet ouvrage, avec plus de 100 reconstitutions d'animaux pour beaucoup inédites, ainsi que de nombreuses photos de fossiles. Un livre événement pour tous les passionnés des mondes perdus !

978-2-7011-4206-7 • 208 p. • 25,00 €



Guide critique de l'évolution

Sous la direction
de Guillaume Lecointre

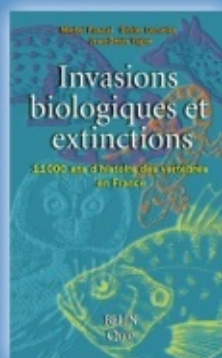
Pourquoi la théorie de l'évolution est-elle si souvent mal comprise du public ? Pourquoi fait-elle l'objet de si nombreuses attaques ? Ces questions sont au cœur de cet ouvrage. Il ne critique pas la théorie contemporaine de l'évolution, mais la façon dont nous en parlons. Il présente le cadre scientifique, épistémologique et historique dans lequel on peut comprendre l'évolution, et donne les clés pour déjouer les pièges que notre langage et nos réflexes premiers nous tendent.

978-2-7011-4797-0 • 576 p. • 35,00 €

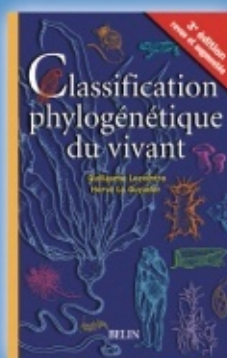


Feuilletez les premières pages de notre sélection de livres en exclusivité et commandez en ligne sur notre site

www.pourlascience.fr



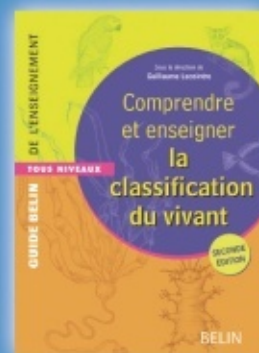
M. Pascal, O. Lorvelec et J.-D. Vigne
978-2-7011-3628-8 • 352 p. • 35,50 €



G. Lecointre et H. Le Guyader
978-2-7011-4273-9 • 560 p. • 41,50 €



A. Meinesz
978-2-7011-4694-2 • 336 p. • 19,50 €



G. Lecointre
978-2-7011-4799-4 • 360 p. • 27,00 €



M. Gargaud, H. Martin, P. López-García,
T. Montmerle, R. Pascal
978-2-7011-4799-4 • 304 p. • 26,50 €



C. Bousquet
978-2-7011-5119-9 • 160 p. • 6,95 €



P. Tassy
978-2-7011-4971-4 • 168 p. • 18,00 €



P. Forterre
978-2-7011-4425-2 • 256 p. • 20,50 €

Prix littéraire
de culture scientifique

SCIENCE & GASTRONOMIE

Cinq fruits et légumes par jour

Les fruits et légumes contiennent des antioxydants parfois bénéfiques, mais leur passage dans le sang dépend de la façon dont les aliments sont cuisinés.

Hervé THIS



La façon de donner vaut mieux que ce qu'on donne, écrivait Corneille. L'abondance de composés antioxydants dans les aliments ne détermine pas nécessairement leurs effets

sur l'organisme. La biodisponibilité et la bioaccessibilité sont des facteurs clefs. Les marathoniens préparent ainsi leur course en mangeant du pain ou des pâtes plutôt que du sucre : la digestion libère lentement le glucose dans le sang et les cellules de l'organisme recevront régulièrement leur carburant.

Cela vaut aussi pour les composés antioxydants. Et les polysaccharides désignés sous le nom de « fibres » jouent un rôle dans l'assimilation des antioxydants, comme le montrent des travaux récents.

Les fruits et légumes sont sources de vitamines, de sels minéraux, de fibres, de composés antioxydants. Certaines études épidémiologiques associent ces derniers à des risques réduits de cancers et de maladies cardio-vasculaires : les antioxydants limitent l'endommagement oxydatif de l'ADN ou du LDL-cholestérol, par exemple. Toutefois une corrélation n'est pas une causalité. Les études *in vivo* étant coûteuses et longues, les nutritionnistes ont exploré *in vitro* les effets possibles des composés végétaux bioactifs.

Une question se pose alors : les composés antioxydants les plus abondants et bénéfiques dans les fruits et légumes sont-ils ceux qui se retrouvent en plus fortes concentrations dans les tissus où ils sont actifs ? La biodisponibilité correspond à la partie qui passe dans le sang, seule importante, et l'on se contente souvent de la bioaccessibilité, qui

est la partie qui se dissout dans les fluides du tractus gastro-intestinal.

Plusieurs centaines de composés phénoliques ont été identifiés dans les fruits et légumes. Ce sont souvent des antioxydants qui interviennent notamment dans les défenses contre les ultraviolets, les insectes ou les micro-organismes. Les composés caroténoïdes, différents des composés phénoliques, sont aussi des antioxydants associés à des risques réduits de maladies vasculaires. Dans les végétaux, ils préviennent la dégradation des chlorophylles par les photons solaires.

Tous les composés antioxydants, phénoliques ou caroténoïdes, doivent, pour passer dans le sang, se libérer de la matrice de l'aliment. Les fibres (composés insolubles des parois végétales) jouent un rôle nutritionnel particulier : elles interfèrent avec l'assimilation des composés phénoliques. Or la plupart des études de la biodisponibilité des antioxydants ont été faites à partir de boissons ou d'aliments dont les antioxydants sont aisément libérés. De là des conclusions hâtives sur leurs effets biologiques.

Des études récentes ont toutefois montré que les composés phénoliques étaient plus biodisponibles qu'attendu grâce à l'action d'une enzyme de l'intestin grêle qui sépare ces composés de leur support. On a déterminé aussi comment la nature des composés phénoliques détermine la valeur de l'absorption. Hélas, et cela a trop rarement été pris en considération, les composés phénoliques bénéfiques des aliments ne sont pas toujours ceux qui figurent dans le sang et les tissus !

Quant aux caroténoïdes, ils ne sont solubles que dans les graisses. De ce fait, ils ne sont absorbés qu'après avoir été séparés de leur environnement alimentaire lors de la mastication et de la digestion, qui mettent les caroténoïdes en micelles, de très petites structures sphériques favorisant l'assimilation. L'essentiel de l'absorption des caroténoïdes liposolubles intervient dans l'intestin grêle, où ils sont dissous dans les graisses alimentaires. La préparation culinaire sera donc un élément clef de la biodisponibilité des caroténoïdes.

Les fibres allongent notamment le temps de résidence gastrique et réduisent la libération des composés : les pectines réduisent la biodisponibilité de certains caroténoïdes qui passe de trois pour cent pour les légumes verts à plus de 30 pour cent pour les carottes ; de même, les purées ou concentrés de tomate sont des sources bien plus riches en antioxydants que les tomates crues.

La leçon est limpide : les nutritionnistes ne pourront pas se contenter d'étudier les antioxydants *in vitro*, ni même *in vivo*. Ils devront apprendre... la cuisine pour déterminer avec quelle efficacité les divers composés passent dans le sang.



Hervé THIS est professeur à AgroParisTech, chercheur à l'INRA (Groupe de gastronomie moléculaire) et directeur scientifique de la Fondation Science & Culture Alimentaire (Académie des sciences).



Retrouvez les articles de Hervé THIS sur www.pourlascience.fr

La librairie **SCIENCE**

Le savoir scientifique au fil des pages...

NOUVELLE
ÉDITION
ENRICHIE



Les mathématiciens ■ Collectif

« Nul ne peut être mathématicien s'il n'a une âme de poète », disait Sophie Kowalevskaja. D'Archimède à Jacques Hadamard, cet ouvrage dresse les portraits d'une vingtaine de mathématiciens, autant artistes que scientifiques.

280 pages • 24 euros • ISBN 978-2-8424-5109-7



À contre-idées ■ Didier Nordon

Trouver du comique dans une idée sérieuse (et inversement), du local dans une idée générale (et inversement), de l'absurde dans une idée sensée (et inversement)... Au fil de ses billets d'humeur, Didier Nordon s'ingénie à bousculer les idées reçues.

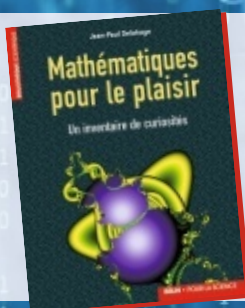
224 pages • 19 euros • ISBN 978-2-8424-5110-3



Au nom de l'infini ■ Jean-Michel Kantor, Loren Graham

Les auteurs retracent un épisode fascinant et dramatique de la création mathématique. Sur les traces de chercheurs russes et français du XX^e siècle, ils nous éclairent sur les liens étroits entre science, religion et politique.

288 pages • 24 euros • ISBN 978-2-8424-5107-3



Mathématiques pour le plaisir ■ Jean-Paul Delahaye

Les mathématiques ne se réduisent pas – heureusement – à ce qu'on nous en apprend à l'école. Partout présentes, elles sont une source de joie et d'épanouissement pour celui qui sait y consacrer un peu d'attention et d'esprit ludique. Dans cet ouvrage, découvrez pourquoi les mathématiques sont faciles et comment s'y adonner est un plaisir.

208 pages • 25 euros • ISBN 978-2-8424-5104-2



La physique buissonnière ■ Jean-Michel Courty, Édouard Kierlik

Une plante plus rapide qu'une mouche, un tuyau qui parle, une cape qui rend invisible, etc. La nature est pleine de surprises pour qui veut bien s'aventurer hors des sentiers battus. Passionnés de physique, les auteurs vous invitent à une promenade sur des chemins de traverse pour comprendre cette physique du quotidien.

160 pages • 22 euros • ISBN 978-2-8424-5105-9

Des livres à découvrir en librairie et sur www.pourlascience.fr

→ SCIENCE ET LITTÉRATURE

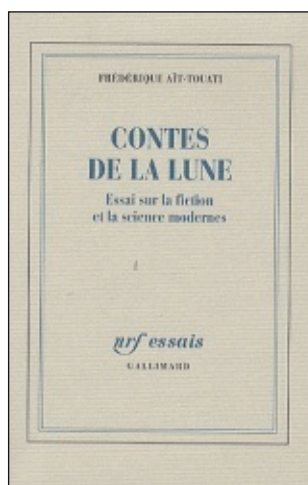
Contes de la Lune

Frédérique Ait-Touati

Gallimard, 2011
[224 pages, 17,50 euros].

On a l'habitude d'opposer science et fiction. La première serait le lieu de la froide raison, la seconde de la fantaisie. On imagine donc que la science moderne n'a pu naître que du rejet ou de la mise à distance de la création littéraire. C'est pourtant l'inverse qui s'est produit, comme nous le raconte Frédérique Ait-Touati dans ce petit livre, tiré d'une thèse, et néanmoins très clair. Non seulement des œuvres de fiction se sont fait l'écho, dès le XVII^e siècle, de la révolution copernicienne en cours, mais elles auraient aussi renforcé la crédibilité de la nouvelle vision du cosmos qui en émanait. La fantaisie littéraire a ainsi fait œuvre de science!

Si ce mariage de la science et de la fiction a si bien fonctionné au XVII^e siècle, c'est que le nouveau cosmos apparaissait très conjectural pour beaucoup. La vision directe ne suffisait pas pour convaincre, il fallait trouver un moyen de mettre en scè-



ne l'observation du ciel. Pour gagner cette bataille de l'opinion, les savants de l'époque se sont mis à imaginer des récits et des fictions. Cette stratégie leur a permis de dépasser les limitations de l'observation et de décrire le nouveau cosmos dont ils faisaient la promotion. Si Kepler, par exemple, est l'auteur de poèmes astronomiques et de fictions lunaires, ce n'est pas pour distraire des lecteurs. Chez lui, la fiction d'un voyage lunaire «montre à voir» de la même façon qu'un télescope le ferait et permet de se déplacer mentalement sur la Lune. Kepler attaque ainsi le fondement de physique aristotélicienne, à savoir la différence entre, d'un côté, le monde sublunaire et corruptible de la Terre, et, de l'autre côté, le monde supralunaire et incorruptible de la Lune. La fiction lunaire permet aussi de s'imaginer percevoir le mouvement de rotation de la Terre. Tout au long du XVII^e siècle, la littérature va ainsi servir à montrer ce qu'on ne peut pas démontrer : la fausseté du géocentrisme.

En analysant l'alliance de la science et de la fiction aux origines de la science moderne, ce livre a un double mérite. D'abord, il rappelle cette part méconnue de l'histoire des sciences et de la littérature. Ensuite, à travers son analyse de la façon dont la fiction a pu fonctionner comme œuvre scientifique, il soulève implicitement la question de l'éventuelle dimension fictionnelle de la science. Une théorie scientifique gagne-t-elle en crédibilité au fur et à mesure que l'histoire qu'elle raconte devient plus captivante ? À méditer...

→ Thomas Lepeltier

Historien des sciences,
Université d'Oxford

→ PALÉONTOLOGIE

La méthode de Zadig

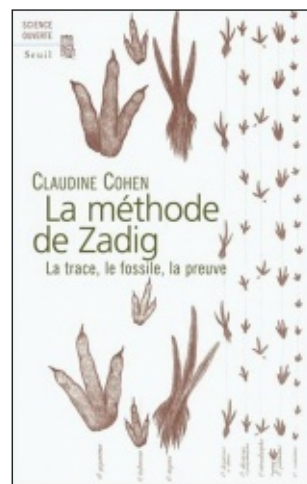
Claudine Cohen

Seuil, 2011,
[341 pages, 23 euros].

Zadig, philosophe oriental imaginé par Voltaire, se signale par sa sagacité. Sorte de Sherlock Holmes avant la lettre, il interprète les moindres indices pour reconstituer des événements qui n'ont laissé que des traces peu compréhensibles pour le commun des mortels, ce qui lui vaut d'ailleurs de sérieux tracas. Après d'illustres prédécesseurs, parmi lesquels Cuvier et Huxley, Claudine Cohen, dans ce livre stimulant, considère la «méthode de Zadig» comme emblématique de la démarche des chercheurs qui s'attachent à reconstituer le passé lointain, qu'il s'agisse de paléontologues ou de préhistoriens.

Il est certain que les uns et les autres n'ont en général à leur disposition que des données incomplètes, d'interprétation souvent délicate, à partir desquelles ils s'efforcent de redonner vie à des êtres depuis longtemps disparus. Ce n'est pas par hasard que l'auteur a choisi de mettre l'accent, entre autres, sur l'étude des traces fossiles, qu'elles aient été laissées par des animaux ou par des humains, car l'ichnologie est une des disciplines qui font le plus appel à la méthode de Zadig, ne serait-ce que parce que le héros de Voltaire se fait remarquer par son habileté à interpréter des empreintes de pas. Quels que soient les indices, l'entreprise est semée d'embûches, et les exemples choisis par Claudine Cohen le montrent bien.

Edward Hitchcock, tentant, au XIX^e siècle, d'identifier les auteurs des pistes fossiles de la vallée du Connecticut, y voit celles d'oiseaux



géants alors qu'elles ont été laissées par des dinosaures. Les préhistoriens qui découvrent l'art des cavernes, œuvre des hommes du Paléolithique, se perdent en conjectures sur sa signification magique ou rituelle. Et lorsque des faussaires s'en mêlent, avec les affaires des faux hommes fossiles de Moulin-Quignon et de Piltdown, les choses se compliquent encore. Néanmoins, Claudine Cohen, à juste titre, ne perd pas confiance en la méthode de Zadig, parce qu'elle est la seule applicable à ces sciences du passé. On peut même dire que, pour ceux qui les pratiquent, elle en est un des charmes.

Le travail du paléontologue et du préhistorien (et l'auteur souligne à juste titre la similarité des approches) a l'aspect d'une enquête, avec ce que cela comporte d'incertitudes, mais aussi de stimulation intellectuelle. Encore faut-il être conscient de ce que cela signifie quant à la façon dont on fait de la science : Claudine Cohen a mille fois raison quand elle écrit que «c'est l'inventivité et l'imagination des chercheurs qui sont requises» pour interpréter les données parcellaires sur lesquelles se fondent aussi bien la paléontologie que la Préhistoire. Vouloir banir l'imagination de la recherche

scientifique, sous prétexte d'on ne sait quelle rigueur intellectuelle mal comprise, serait faire dangereusement fausse route.

→ **Eric Buffetaut**

Laboratoire de géologie,
École normale supérieure, Paris

→ MÉDECINE

Une histoire de la médecine ou le souffle d'Hippocrate

J.-Cl. Ameisen, P. Berche
et Y. Brohard

La Martinière, 2011
(224 pages, 35 euros).

Au 45 de la rue des Saints-Pères, à Paris, se trouve un grand bâtiment de pierre blanche dont la façade, percée d'une monumentale porte en bronze, est ornée de 45 médaillons de 120 centimètres de diamètre sculptés par 14 artistes de l'entre-deux-guerres. Ces médaillons, point de départ de cet ouvrage, sont un témoignage artistique et la signature



re d'une certaine conception de l'histoire de la médecine. Portée par le souffle d'Hippocrate, celle-ci aurait peu à peu affirmé sa rationalité à partir de lointaines origines mythologiques et contre les superstitions variées.

Même si les historiens de la médecine ont aujourd'hui quelque peu affiné ces vues, l'idée générale (« des mythes à la science » dit Axel Kahn dans la préface) reste au fond tout à fait défendable. Il serait d'ailleurs inexact de réduire l'ouvrage au seul rôle de vecteur de cette conception, ou bien à une illustration supplémentaire de la rencontre de l'art et de la science soutenue par une vision « esthétisante » de la médecine aujourd'hui un peu à la mode. Les médaillons servent de prétexte à un voyage panoramique à travers le temps, de la Haute Antiquité jusqu'à nos jours, où Patrick Berche relate avec clarté les découvertes du corps humain et du monde vivant invisible et Jean-Claude Ameisen celles concernant l'esprit. L'histoire entamée par les médaillons (leur récit en image s'arrête à la Renaissance) se prolonge ainsi jusqu'à nos jours, rythmée par les textes élégants de l'historien de l'art Yvan Brohard qui a par ailleurs judicieusement illustré l'ouvrage grâce au fond iconographique de la Bibliothèque interuniversitaire de médecine.

Dans l'esprit ayant présidé à la genèse du livre, on peut regretter qu'aucune partie descriptive ne récapitule lesdits médaillons (on en trouve une liste exhaustive sur le site Internet du Centre universitaire des Saints-Pères de l'Université Paris-Descartes) et qu'aucune notice biographique ne concerne leurs créateurs. On l'a compris, il s'agit avant tout d'un livre stylé et sérieux, mais un « beau livre » plus qu'un livre savant, destiné à figurer dans la bibliothèque du public instruit qui y retrouvera les grands repères traditionnels de la culture médicale sous une forme particulièrement soignée.

→ **Jean-Claude Dupont**
Université d'Amiens

→ ART ET SCIENCE

Le manifeste du Laboratoire

David Edwards

Odile Jacob, 2011
(240 pages, 23,90 euros).

Ce livre n'est pas un essai sur les relations entre arts et science, c'est le récit d'une histoire récente, qui se poursuit, de création d'un réseau international de laboratoires *Artscience* qui sont nés de rêves, d'idées tirées de la biologie, de rencontres entre artistes, scientifiques, étudiants, idéalistes.



philanthropes. Cette histoire se développe sur plusieurs plans : culturel, éducatif, conceptuel, industriel et commercial. Vous pourrez y trouver une recherche sur une façon d'élaborer des produits comme le *Whif* – un chocolat à inhaler – l'*Andrea* – un filtre naturel – le *Pumkin* – un moyen d'alimenter en eau potable les pays africains. Vous y croiserez des étudiants, des enseignants, des industriels, des commerciaux, tous passionnés par la conduite de projets dont certains aboutissent à des produits distribués par des chaînes commerciales. De nombreuses expériences y sont contées. Celle d'un groupe d'étudiants africains qui se rencontrent à Harvard, aux États-Unis : partant

Brèves

JEAN-HENRI FABRE EN SON HARMAS DE 1879 À 1915

Anne-Marie Slézac

Édisud / MNHN, 2011
(128 pages, 17 euros).



Depuis 2007, l'harnas de l'entomologiste Jean-Henri Fabre – le domaine provençal qui fut son laboratoire pendant 36 ans – est ouvert au public. Chargée de le restaurer en 1999, l'auteur retrace ici l'entreprise, qui dura huit ans. L'occasion d'évoquer la vie de l'auteur des *Souvenirs entomologiques* en l'illustrant de nombreux documents inédits.



LA VIE, L'ÉVOLUTION ET L'HISTOIRE

Michel Morange

Odile Jacob, 2011
(208 pages, 23,90 euros).

L'auteur part d'un constat : il existe un fossé entre l'étude des mécanismes du vivant et la biologie évolutionniste. Comment le combler ? C'est à cette réflexion, dont dépend la biologie de demain, qu'il nous invite. Peu à peu une solution se dessine : il faut repenser les rapports de la biologie au temps.

PETIT DICTIONNAIRE DU CHARLATANISME MÉDICAL

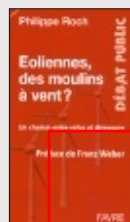
Jacques Poirier

Hermann, 2011
(198 pages, 22 euros).



Rebouteux, homéopathie, panseur de secrets, Voronoff, acupuncture, ostéopathie... sont quelques-unes des nombreuses entrées de ce dictionnaire historique. Chacune est l'occasion d'évoquer l'origine d'une thérapie non conventionnelle et son efficacité, références à l'appui. Médecin et historien de la médecine, l'auteur dresse un portrait passionnant et sans complaisance de ces pratiques, de celles tolérées par le Conseil de l'ordre à l'escroquerie pure.

Brèves

ÉOLIENNES,
DES MOULINS À VENT ?

Philippe Roch Favre, 2011
(165 pages, 13 euros).

À partir du point de vue suisse, l'auteur fait le point sur le contexte énergétique dans lequel s'inscrit le développement de l'électricité éolienne, sur les politiques qui la rendent possible, sur ses filières techniques, etc. Il étudie ensuite les nuisances des éoliennes, dont le bruit, les infrasons, les risques pour l'avifaune et les chauves-souris, les chutes de glace, le foudroiement, etc.

DICTIONNAIRE
DES NOMS DE LIEUX
DE LA FRANCE

Pierre-Henri Billy
Errance, 2011
(640 pages, 39 euros).

Pour obtenir les 1500 articles de ce dictionnaire toponymique, l'auteur a mis au point une méthode systématique qui fait largement appel à la comparaison. Le résultat est non seulement particulièrement solide, mais plein de surprises, tant il a l'art de déceler une racine préindoeuropéenne derrière un nom latinisé.



LA VIE OSCILLATOIRE

Albert Goldbeter
Odile Jacob, 2011
(367 pages, 27,90 euros).

L'auteur réalise la synthèse des connaissances sur les rythmes biologiques, tels les rythmes neuronaux, les rythmes hormonaux, les rythmes saisonniers, etc. Très divers, les mécanismes qu'il décrit chapitre après chapitre ont cependant une unité, nous apprend-il : ils résultent de l'intégration, dans les organismes, des régulations mises en place au cours de l'évolution.

d'une idée sur la mise en œuvre d'éclairages pour les futurs Jeux olympiques de Londres utilisant des générateurs électriques à bactéries, ils ont mis au point des générateurs destinés à alimenter les villages les plus isolés de l'Afrique. Celle de la coopération entre un artiste plasticien japonais et un mathématicien américain. Celle encore d'une artiste indienne et un médecin américain. Cette histoire de laboratoires est aussi délocalisée : partie de Harvard, Dublin, Londres, elle passe par Paris, Pretoria, Bruxelles. Vous y lirez comment ces esprits originaux exploitent et détournent les concepts de musées, d'expositions, de galeries d'art. Quelques photographies illustrent cet ouvrage. La dernière partie est une réflexion sur des façons nouvelles de concevoir l'innovation, l'altruisme, la bande créatrice.

Le concept de laboratoire *Art-science* d'idées transversales prend comme modèle le Laboratoire de Paris. Ce livre tourné vers un avenir qui se dessine à peine est une tentative de définir des lignes d'action d'un « bazar » en dehors des institutions établies – les cathédrales –, mais en utilisant ce qu'elles peuvent encore apporter sur les formations initiales.

→ **Gérard Tronel**
UPMC, Paris

→ HISTOIRE DES SCIENCES

Histoire populaire
des sciences

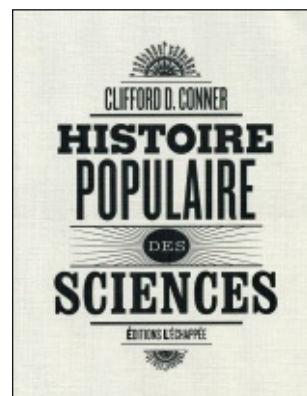
Clifford D. Conner
L'échappée, 2011
(560 pages, 28 euros).

Autrefois, l'histoire des sciences, surtout pratiquée par des philosophes et des « vieux savants », était celle des grandes théories et des grands

hommes : les Grecs, Galilée, Newton, Einstein, la mécanique quantique. Depuis plusieurs décennies, l'intérêt s'est diversifié : historiens, sociologues, linguistes, ingénieurs se sont lancés vers de nouvelles perspectives à propos des temps passés, se penchant sur la culture scientifique, l'enseignement, les relations avec les techniques, les réseaux de chercheurs, etc.

Clifford Conner milite pour des approches nouvelles et adopte un point de vue très « typé » : mettre en avant toutes les contributions des paysans de la Préhistoire, des marins, des artisans du Moyen Âge, des bricoleurs en informatique dans les garages. Visiblement, l'auteur a été impressionné par l'intervention à Londres, en 1931, du Soviétique Boris Hessen (récemment traduite en français sous le titre *Les racines sociales et économiques des Principia de Newton*, Vuibert, 2006). En 1931, lors du 2^e congrès international d'histoire des sciences, les Soviétiques ont envoyé une délégation chargée d'exposer les idées marxistes sur les sciences. L'intervention la plus remarquée fut celle de Hessen qui montra, d'une façon assez convaincante, à quel point les idées théoriques de Newton étaient liées aux intérêts économiques et sociaux du capitalisme naissant, alors qu'on les présentait habituellement comme les fruits d'un génie imprévisible.

L'ouvrage de C. Conner, inspiré, comme le titre l'indique, de l'*Histoire populaire des États-Unis* de Howard Zinn, apporte de nombreux éléments concrets sur la créativité des gens ordinaires. La bibliographie est très informative et permet des prolongements intéressants. On regrettera un peu



que l'auteur, probablement sans en avoir vraiment conscience, se limite pour l'essentiel à citer des auteurs passés ou présents dans le seul champ anglo-américain.

Si sympathique et stimulante soit la vision de C. Conner, on doit néanmoins apporter quelque réserve à son essai. À trop vouloir... il est conduit à minimiser l'importance de la réflexion, de la concentration, de la recherche théorique à long terme (qui prend du temps et qui ne rapporte pas !). À l'heure où les dirigeants publics et privés, de par le monde, veulent soumettre et contrôler les activités scientifiques, voire surveiller et punir, n'est-il pas hasardeux d'insister unilatéralement sur les côtés empiriques et inductifs de la découverte ? Ne donne-t-on pas un espace à ceux qui attaquent la recherche gratuite ou désintéressée et précarisent à outrance les chercheurs ? Poser la question, c'est un peu y répondre.

Malgré ce travers, l'ouvrage est à recommander par la richesse de ses informations, son originalité, sa volonté constructive et son invitation au débat.

→ **Pierre Crépel**
Université Lyon 1



Retrouvez l'intégralité de votre magazine
et plus d'informations sur :
www.pourlascience.fr