

BIONIQUE

Sommes-nous
déjà des cyborgs ?

ÉTHOLOGIE

Intelligent comme...
un éléphant !

PHYSIQUE

Rayons X: la course
à l'ultrapuissance

POUR LA SCIENCE

Décembre 2014 - n° 446

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

Le trou noir à l'origine du Big Bang

Notre Univers est-il né d'une
étoile à quatre dimensions ?

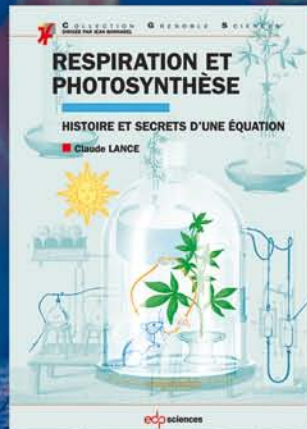
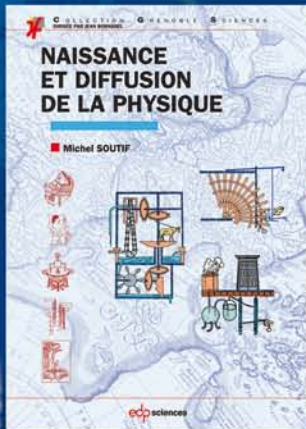
M 02687 - 446 - F: 6,20 € - RD



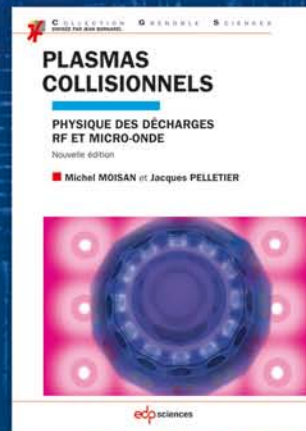
GRENOBLE SCIENCES

■ CONSEIL ■ EXPERTISE ■ LABELLISATION ■ ÉDITION

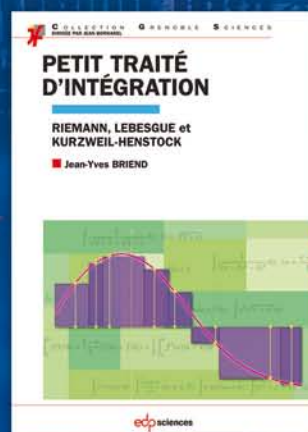
En 2014, Grenoble Sciences a labellisé
des ouvrages originaux pour des publics variés.



■ Pour un large public cultivé



■ Une approche originale d'un concept bien connu



■ Des livres de référence de niveau Master

www.grenoble-sciences.fr

■ GRENOBLE SCIENCES

POUR COMMANDER : les ouvrages en français sont en vente dans le rayon Sciences des librairies ou sur internet : <http://www.edition-sciences.com>

Université
Joseph Fourier
GRENOBLE

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

Rhône-Alpes Région

POUR LA SCIENCE

www.pourlascience.fr

8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06

Groupe POUR LA SCIENCE

Directrice des rédactions : Cécile Lestienne

Pour la Science

Rédacteur en chef : Maurice Mashaal

Rédactrice en chef adjointe : Marie-Neige Cordonnier

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

Dossier Pour la Science

Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin

Cerveau & Psycho • L'Essentiel Cerveau & Psycho

Rédactrice en chef adjointe : Bénédicte Salthun-Lassalle

Rédacteur : Sébastien Bohler

Développement numérique : Philippe Ribeau-Gésippe

Directrice artistique : Céline Lapert

Secrétariat de rédaction/Maquette : Sylvie Sobelman, Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy, Caroline Vanhoove

Marketing : Élise Abib et Ophélie Maillet

Direction financière et direction du personnel : Marc Laumet

Fabrication : Marianne Sigogne et Olivier Lacam

Presse et communication : Susan Mackie

Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé

Anciens directeurs de la rédaction : Françoise Pétry

et Philippe Boulanger

Conseiller scientifique : Hervé This

Ont également participé à ce numéro :

Silvana Condemi, Matthieu Laneuville, Uwe Meierhenrich, Renaud Parentani, Christophe Pichon, Romain Pigeaud, Alain Riazuelo, Étienne Save

PUBLICITÉ France

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin

(jf.guillotin@pourlascience.fr)

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

SERVICE ABONNEMENTS

Ginette Bouffaré et Nada Mellouk-Raja. Tél. : 01 55 42 84 04

Abonnement en ligne : <http://www.pourlascience.fr>

Courriel : abonnements@pourlascience.fr

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

Commande de livres ou de magazines :

Pour la Science - 628 avenue du Grain d'Or 41350 Vineuil

DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE

Contact kiosques : À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet

Tél. : 04 88 15 12 41

Information/modification de service/réassort :

Magazine disponible sur www.direct-editeurs.fr

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.

Executive editor: Fred Gutierl. Design director: Michael Mrak. Editors: Ricky Rusting, Philip Yam, Robin Lloyd, Mark Fischetti, Seth Fletcher, Christine Gorman, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong.

President : Keith McAllister. Executive Vice President : Michael Florek.

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

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

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



Maurice Mashaal
rédacteur en chef

Monter en dimension

Big Bang... Cette expression, forgée avec dérision par l'astronome britannique Fred Hoyle (1915-2001), a fait florès, tout comme le modèle qu'elle désigne. Selon cette théorie, notre Univers – espace et temps compris – est issu de l'expansion, depuis quelque 14 milliards d'années, d'un état extrêmement dense et chaud. Avec son lot d'améliorations et d'ajouts, la théorie du Big Bang forme ce qu'il est convenu de nommer le modèle standard de la cosmologie.

Malgré les indéniables succès de ce modèle, plusieurs questions restent en suspens. En particulier celle de l'origine même du Big Bang. Quelle est la raison d'être de cet événement ? Y a-t-il un « avant-Big Bang » ? De telles questions, pourrait-on penser, relèvent de la métaphysique et non de la science. Mais l'ambition des théoriciens est telle, que certains s'en sont emparés et ont imaginé divers scénarios. L'un des plus originaux, récemment publié, est présenté ici par ses auteurs (voir pages 24-31).

Le Big Bang, une projection holographique d'un cataclysme quadridimensionnel ?

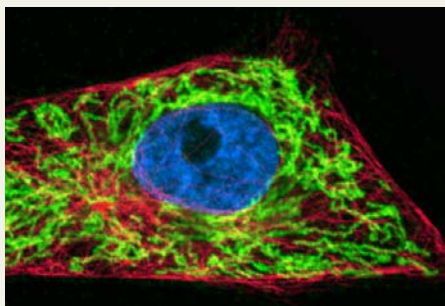
Ce modèle invoque l'objet le plus intrigant de l'astrophysique : un trou noir, astre si massif et compact que son champ de gravitation empêche même la lumière de s'en échapper. Sauf qu'ici, il ne s'agit pas d'un trou noir classique, mais d'un trou noir né de l'effondrement d'une étoile dans un univers où l'espace aurait quatre dimensions, et non trois. Par une sorte de projection dite holographique, le Big Bang et notre Univers tridimensionnel seraient le résultat de ce cataclysme quadridimensionnel.

L'idée d'un espace-temps ayant davantage de dimensions que celles accessibles à nos sens est récurrente dans l'histoire de la physique et de la cosmologie depuis les années 1920. On a tenté de l'exploiter dans des contextes divers ; sans véritable succès jusqu'ici. Mais elle revient si souvent que l'on ne s'étonnera pas outre mesure si le verdict des expériences et des observations lui devient favorable un jour, sous une forme ou une autre ! ■

1 **Édito**

Actualités

- 4 Un rayonnement de Hawking en laboratoire
- 5 L'anomalie du Karakorum en partie expliquée
- 7 Voir sous la peau
- 8 Les prix Nobel 2014



- 10 Des bactéries qui modulent l'appétit

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

- 12 **Point de vue**
Quelle transition énergétique pour la France ?
Patrick Criqui
- 14 **Entretien**
Publication scientifique : vers l'accès ouvert institutionnel ?
Denis Jerome
- 18 **Lu sur SciLogs.fr**
Le goût de l'intelligence
Richard Taillet
- 21 **Homo sapiens informaticus**
Homo habilis hypercapitalisticus
Gilles Dowek
- 22 **Cabinet de curiosités sociologiques**
Une question de taille
Gérald Bronner

Ce numéro comporte deux encarts d'abonnement *Pour la Science* brochés sur la totalité du tirage ainsi qu'une offre de parrainage spéciale Noël posée sur toute la diffusion abonné.
En couverture : © Mark Garlick/Science Photo Library/Corbis

À LA UNE

24

COSMOLOGIE

Le trou noir à l'origine du Big Bang

*Niayesh Afshordi,
Robert Mann
et Razieh Pourhasan*

Le Big Bang et l'Univers qui en est issu pourraient être la conséquence de la formation d'un trou noir dans un espace à quatre dimensions. Ce scénario résoudrait certaines difficultés de la cosmologie.



32

MATHÉMATIQUES

Martin Gardner, le jeu se poursuit

Colm Mulcahy et Dana Richards

Avec la rubrique mensuelle qu'il a tenue pendant près de 25 ans dans le magazine *Scientific American*, Martin Gardner a marqué le monde des mathématiques récréatives et a inspiré de nombreuses personnes.

38

ÉTHOLOGIE

Une intelligence d'éléphant

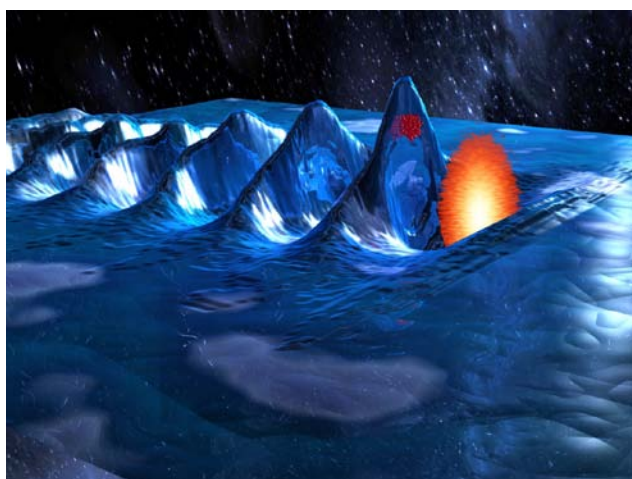
Anna Smet, Catherine Hobaiter et Richard Byrne

Probablement en raison de leur organisation sociale complexe, les éléphants ont développé d'étonnantes capacités de mémorisation, de coopération, de compréhension des autres et de communication.

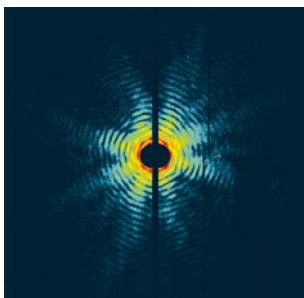


46 **PHYSIQUE****Produire des rayons X et γ sur une table***Kim Ta Phuoc, Cédric Thauray et Sébastien Corde*

Grâce à des ondes de sillage créées par des impulsions laser ultrabrèves qui traversent un gaz, les chercheurs mettent au point des sources compactes et puissantes de rayons X ou gamma.

54 **PHYSIQUE****Le plus puissant faisceau de rayons X***Nora Berrah et Philip Bucksbaum*

Le grand accélérateur linéaire de l'Université Stanford a été converti en laser à électrons libres. Il a ainsi donné naissance à la plus intense source de rayons X du monde.

62 **TECHNOLOGIE****Décupler nos sens***Gershon Dublon et Joseph Paradiso*

Aujourd'hui, nous vivons déjà dans un monde truffé de capteurs. Demain, de nouveaux dispositifs matériels et logiciels nous connecteront à ce déluge de données. Pour une perception augmentée ?

Rendez-vous70 **Histoire des sciences****Madame Picardet, traductrice scientifique ou cosmétique des Lumières ?***Patrice Bret*

Au XVIII^e siècle à Dijon, une femme acquit une réputation internationale en traduisant des écrits de chimistes et minéralogistes européens.

76 **Logique & calcul****Une seule intelligence ?***Jean-Paul Delahaye*

Fabriquer de l'intelligence est un défi que l'informatique veut relever. Quand elle réussit, c'est toujours de manière limitée et en évitant d'aborder de front l'intelligence humaine.

82 **Science & fiction****Les cyborgs sont parmi nous !***J. Sébastien Steyer et Roland Lehoucq*84 **Art & science****Mondrian et les arbres***Loïc Mangin*86 **Idées de physique****Batailles de toupies***Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik*89 **Question aux experts****Peut-on échapper à la pollution en ville ?***Isabelle Coll*91 **Science & gastronomie****Aubergines en osmose***Hervé This*92 **À lire**96 **Bloc-notes****Les chroniques de Didier Nordon****Aussi en numérique !****POUR LA SCIENCE.fr****Archives**
depuis 1996**Application**
Smartphone et Tablette

Suivez-nous sur les réseaux sociaux

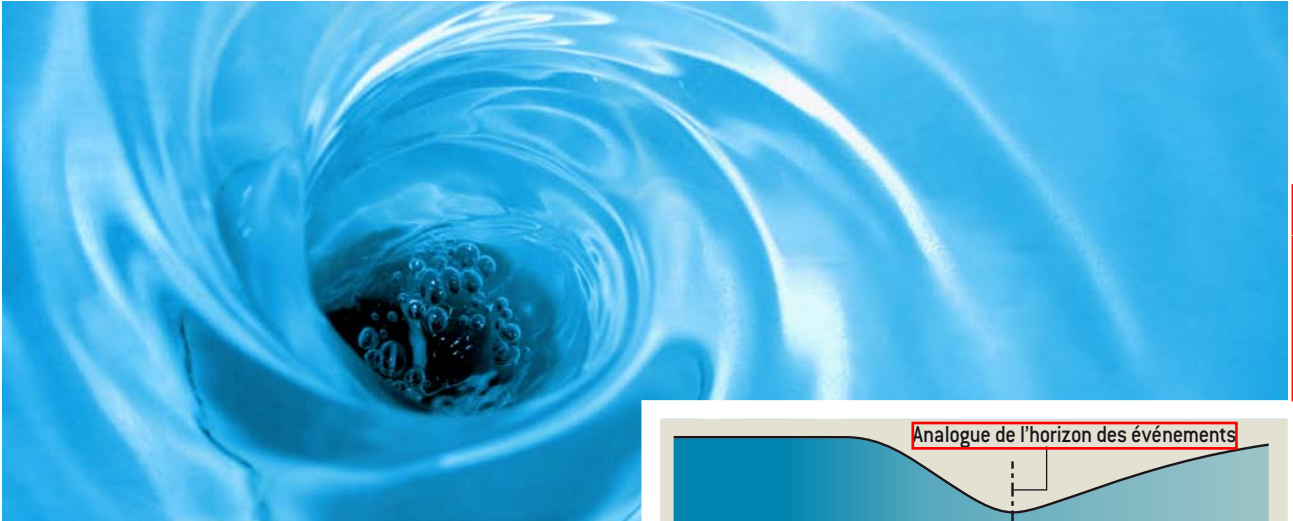


Actualités

Physique

Un rayonnement de Hawking en laboratoire

Il est possible de créer dans un fluide des « trous noirs acoustiques ». Ils émettraient eux aussi un analogue du rayonnement de Hawking, ce faible flux de particules qui émane des trous noirs.



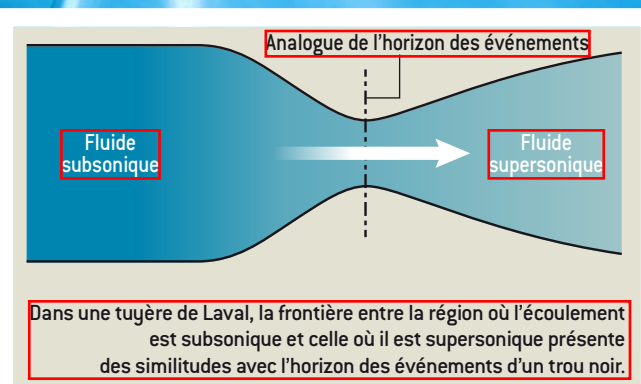
En 1974, Stephen Hawking a montré qu'un trou noir, astre si compact que même la lumière ne peut s'en échapper, n'est pas totalement noir : il émet un rayonnement ténu. Il paraît impossible d'observer le rayonnement de Hawking, trop faible pour être distingué du rayonnement du fond diffus cosmologique, vestige du Big Bang. Cependant, pour étudier les trous noirs, les physiciens ont développé une approche alternative qui repose sur les similitudes entre les équations qui décrivent les trous noirs et celles qui gouvernent les ondes acoustiques dans un fluide. Jeff Steinhauer, du Technion en Israël, a étudié un fluide d'atomes ultrafroids dans des conditions particulières, et a mis en évidence l'équivalent du rayonnement de Hawking dans ce système.

Un trou noir présente une frontière, nommée horizon des événements. Un objet qui le franchit en tombant vers le centre du

trou noir ne peut plus s'échapper, car la vitesse requise pour se libérer du champ gravitationnel est supérieure à celle de la lumière.

S. Hawking s'était intéressé à ce qui se passe à l'échelle microscopique à proximité de l'horizon. D'après la mécanique quantique, des paires particule-antiparticule naissent spontanément dans le vide et s'annihilent très vite sans laisser de trace. Mais S. Hawking avait montré qu'à proximité de l'horizon, la paire peut être séparée : l'une des particules tombe dans le trou noir tandis que l'autre s'échappe. Pour un observateur éloigné, le trou noir semble émettre des particules et perd donc de la masse : il « s'évapore ».

Pour un trou noir de masse stellaire, cette évaporation est lente et le rayonnement est trop faible pour être détecté. Et il n'est évidemment pas possible de créer un trou noir en laboratoire. Mais les physiciens ont trouvé une alternative intéressante : les trous



noirs acoustiques. La propagation du son dans un fluide présente parfois des points communs avec celle de la lumière près d'un trou noir. Considérons par exemple une tuyère de fusée, un cylindre dont le diamètre diminue puis augmente à la sortie (une tuyère de Laval, voir la figure). Dans le resserrement se produit un effet Venturi : le fluide accélère et atteint des vitesses supersoniques dans la partie évasée – les molécules se déplacent plus vite que des ondes acoustiques dans le milieu. Ainsi, si on émet des ondes acoustiques à contre-courant dans la partie où le fluide est supersonique, elles sont emportées par le courant et ne peuvent jamais remonter la tuyère jusqu'au bout.

C'est l'équivalent acoustique d'un horizon des événements.

L'analogie se retrouve jusque dans les équations qui décrivent la lumière autour d'un trou noir et les ondes acoustiques dans le fluide. Les physiciens ont alors supposé que les trous noirs acoustiques émettent aussi un rayonnement de Hawking, c'est-à-dire des ondes acoustiques, près de l'horizon. Cependant, les expériences réalisées jusqu'ici n'avaient pas réussi à mettre en évidence ce rayonnement.

J. Steinhauer a trouvé une solution pour amplifier le signal. Il a refroidi un ensemble d'atomes de rubidium à quelques nanokelvins pour former un condensat de Bose-Einstein, un fluide ayant un

Climatologie

L'anomalie du Karakorum en partie expliquée

Si la plupart des glaciers de l'Himalaya ont perdu de leur masse, le massif du Karakorum fait exception. Sarah Kapnick, de l'Université Princeton, et ses collègues ont identifié les raisons de cette anomalie. Étienne Berthier, glaciologue au Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales, nous explique ces résultats récents.

comportement quantique collectif. Lorsque ce condensat est traversé par un faisceau laser, les atomes touchés atteignent une vitesse supersonique.

Comme dans les dispositifs précédents, les ondes acoustiques émises depuis l'horizon sont, en principe, trop faibles pour être mesurées. Cependant, le système a en réalité deux horizons, ce qui est aussi le cas pour les trous noirs en rotation, dits de Kerr. Le laser crée un puits de potentiel dans le condensat, où les atomes sont accélérés. Les ondes acoustiques formées dans ce puits sont piégées entre les deux bords du puits, qui jouent le rôle d'horizons. Elles sont réfléchies d'un bord à l'autre et sont ainsi amplifiées, un peu comme les photons qui font des va-et-vient entre les miroirs d'un laser (ce qui amplifie son rayonnement). Certaines ondes parviennent cependant à s'échapper au niveau d'un des horizons, de façon analogue à ce qui se passe avec une paire particule-antiparticule dans un trou noir stellaire. Le rayonnement de Hawking devient alors mesurable.

Il n'est pas encore possible de vérifier que ces ondes présentent toutes les caractéristiques du rayonnement de Hawking prévues par la théorie, mais la piste est prometteuse. Ce genre de dispositif permettrait même d'étudier des analogues acoustiques de l'intrication quantique, situation où deux particules forment un système aux propriétés indissociables même lorsqu'elles sont très éloignées (comme une paire particule-antiparticule dont l'une des composantes s'éloigne du trou noir tandis que l'autre reste piégée).

Sean Bailly

Nature Physics, en ligne le 12 octobre 2014

Pourquoi parle-t-on d'« anomalie du Karakorum » ?

Étienne Berthier: Le massif du Karakorum est situé à la frontière entre le Pakistan, l'Inde et la Chine. Il recèle de nombreux glaciers couvrant une surface de 20 000 kilomètres carrés. Diverses observations réalisées sur le terrain ou par satellites ont montré que cet ensemble de glaciers est stable ou a gagné légèrement en masse ces dernières années, contrairement aux autres glaciers de la chaîne himalayenne, d'où l'« anomalie ».

Pourquoi la mise en évidence de cette anomalie a-t-elle défrayé la chronique en 2012 ?

É. B.: L'existence d'une région du globe où les glaciers ne perdent pas de la masse a beaucoup fait couler d'encre et les climato-sceptiques ont rapidement instrumentalisé cette observation pour nier l'existence d'un réchauffement planétaire. Évidemment, une observation locale ne vient pas en contradiction avec un phénomène global, mais il était urgent que les climatologues s'emparent de cette question et apportent des éléments d'explication sur les glaciers du Karakorum.

Les spécialistes avaient-ils des pistes pour expliquer l'évolution du Karakorum ?

É. B.: Il y avait plusieurs pistes. Par exemple, le comportement saisonnier des précipitations diffère dans



le Karakorum et dans les autres régions himalayennes. Par ailleurs, la haute altitude moyenne des glaciers du Karakorum peut aussi jouer un rôle. En effet, cette région



É. Berthier est chargé de recherche au LEGOS, CNRS.

est très accidentée, avec quatre sommets à plus de 8 000 mètres, dont le K2, et de nombreux pics à plus de 7 000 mètres. On a aussi évoqué un accroissement possible des précipitations depuis 1979.

Que montrent les récentes simulations ?

É. B.: S. Kapnick et ses collaborateurs ont comparé trois régions himalayennes (Karakorum, l'Himalaya central et l'Himalaya oriental). Ils ont montré que les conditions météorologiques diffèrent entre ces régions. Bien que les altitudes soient comparables,

la position du Karakorum au Nord-Ouest des montagnes himalayennes fait que la température hivernale y est nettement plus basse que dans les autres régions. Cela explique que les précipitations, surtout hivernales, restent sous forme de neige même si la température augmente. Dans les autres massifs, l'essentiel de l'accumulation de neige se produit en été, au moment de la mousson. La température y est alors proche de 0 °C; il y a donc une grande sensibilité au réchauffement climatique: la pluie remplace la neige et les glaciers perdent de la masse.

Ces simulations suffisent-elles pour expliquer l'anomalie ?

É. B.: C'est un premier pas, l'une des avancées étant l'utilisation d'un modèle régional de climat qui, avec sa maille de 50 kilomètres, permet de rendre compte des grands traits de la topographie, chahutée dans cette région. La prochaine étape consistera à l'associer avec un modèle de glacier pour obtenir un bilan quantitatif d'évolution des régions glaciaires.

S. B.

S. Kapnick et al., Nature Geoscience, en ligne, 12 octobre 2014

Deux familles d'exocomètes

Flavien Kiefer, de l'Institut d'astrophysique de Paris, et ses collègues ont détecté 493 comètes autour de l'étoile Bêta Pictoris. Ces comètes se répartissent en deux familles aux caractéristiques différentes. Les premières sont proches de l'astre ; les secondes sont éloignées et résulteraient de la fragmentation d'un objet plus massif. D'après les observations, elles seraient soit plus jeunes, soit plus grosses que les comètes de la première famille. Ce résultat nous donne une image de ce qu'a pu être le Système solaire lorsqu'il n'était âgé que de quelques centaines de millions d'années.

Des océans plus acides

L'acidité des océans a augmenté de 26 % depuis le début de l'ère préindustrielle à cause du CO_2 atmosphérique. Cette augmentation pourrait atteindre 170 % d'ici 2100 si rien n'est fait, selon un rapport publié début octobre par le secrétariat de la Convention sur la diversité biologique. L'acidification menace certains écosystèmes vulnérables et les activités humaines liées à la mer, telle l'aquaculture. De nombreuses études en cours cherchent à préciser les impacts écologiques et économiques du phénomène.

Détecter plus tôt un cancer

La détection précoce d'un cancer est l'une des clefs d'un traitement efficace. L'équipe de Paul Hofman, de l'Université de Nice, a réussi à détecter des cancers du poumon avant même que les tumeurs ne soient visibles par l'imagerie. Dès le début de la formation d'une tumeur invasive, des cellules cancéreuses en faibles nombres circulent dans le sang. Les chercheurs ont cherché à les détecter grâce à un test sanguin conçu avec la société Rarecells Diagnostics. Ils ont ainsi prédit l'apparition de tumeurs chez cinq patients, qu'ils ont pu opérer très tôt et qui n'ont eu depuis aucune récurrence.

Chimie

Pourquoi l'ADN tourne-t-il toujours à droite ?



© Shutterstock.com/vision

Certaines molécules sont dites **chirales** : comme les mains, elles existent en deux versions non superposables, l'une étant le miroir de l'autre. Mais certaines molécules n'existent que sous une seule des deux formes alors que l'autre serait tout aussi possible. C'est le cas notamment de la molécule d'ADN, qui ne se forme naturellement que selon une structure hélicoïdale droite. Pourquoi la molécule d'ADN qui tournerait vers la gauche n'existe-t-elle pas ?

Joan Dreiling et Timothy Gay, de l'Université du Nebraska, ont identifié un processus qui crée une asymétrie dans certaines dissociations électroniques de molécules chimiques. C'est un pas vers la compréhension de l'asymétrie du vivant.

Les chercheurs ont bombardé un gaz de bromocamphre, soit gauche soit droit, avec des électrons de très basse énergie. Ils ont montré que le mécanisme de dissociation électronique crée une asymétrie d'environ 0,03 %. Il reste à tester ce processus avec des molécules du vivant.

Un autre mécanisme, lié à la lumière polarisée éclairant la surface de comètes, peut aussi détruire préférentiellement des molécules gauches ou droites. L'atterrisseur *Philae* de la sonde *Rosetta* est d'ailleurs équipé pour analyser les molécules organiques dans la glace de la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko, ce qui permettra de tester ce scénario.

S. B.

Phys. Rev. Lett., vol. 113, 118103, 2014

Insolite

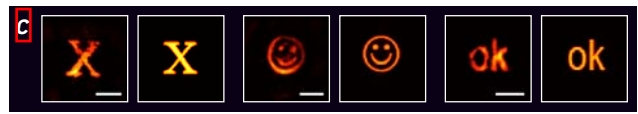
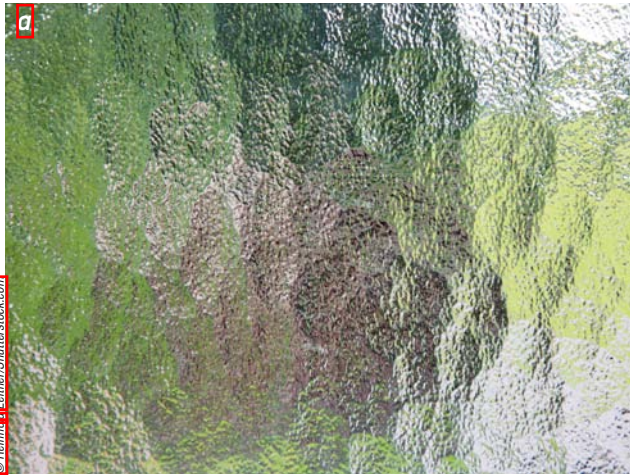
Des robots chez les manchots

Comment étudier les manchots sans leur imposer notre présence, susceptible de les stresser et de fausser les résultats ? Yvon le Maho, de l'Institut pluridisciplinaire Hubert Curien, et ses collègues ont élaboré un lecteur RFID monté sur un petit rover et déguisé en poussin. Les manchots étaient bien moins perturbés que par un humain et laissaient le rover s'approcher assez pour qu'il puisse lire leur puce d'identification, préalablement greffée.



© PRODUCTIONS L'INSTITUT HUBERT CURIE

Physique



Voir sous la peau

Des physiciens ont élaboré une technique simple et rapide pour voir à travers un milieu diffusant, tel qu'une vitre dépolie ou un tissu biologique. Des applications en imagerie médicale sont envisagées.

Essayez de voir à travers le verre dépoli d'une fenêtre de salle de bain, la vitre teintée d'une voiture ou la peau. Impossible ? L'équipe de Sylvain Gigan, du Laboratoire Kastler-Brossel (UPMC, ENS, CNRS, Collège de France) à Paris, en collaboration avec l'Institut Langevin (ESPCI ParisTech, CNRS, UPMC, P7, Inserm), a pourtant élaboré une technique qui rend cette prouesse possible.

Les tissus biologiques et plus généralement les milieux diffusants dévient la lumière dans toutes les directions, si bien que des objets placés derrière n'apparaissent que comme des taches floues. De nombreux travaux visent à reconstituer l'image des objets vus à travers ces milieux. En 2008, l'équipe de Changhuey Yang, à l'Institut californien de technologie, a par exemple reconstitué l'image de motifs imprimés vus à travers une mince couche de... blanc de poulet ! Les chercheurs se sont fondés sur des techniques dites de renversement temporel, où l'on renvoie la lumière en sens inverse (elle repasse à travers le milieu diffusant) pour reconstituer l'image de l'objet. Cependant, ces

techniques nécessitent des dispositifs complexes et, en outre, l'image est reconstruite du même côté que l'objet que l'on cherche à observer...

L'équipe de S. Gigan a exploité un autre principe : une tache de diffusion n'est pas organisée de façon aléatoire, et sa structure contient des informations sur celle de l'objet. En superposant la tache avec une version décalée d'elle-même, on construit une figure dite d'autocorrélation, à partir de laquelle on peut mettre en évidence les régularités de la structure et reconstruire l'image de l'objet.

L'idée n'est pas nouvelle. Des les années 1970, l'astronome français Antoine Labeyrie l'avait utilisée pour détecter certaines étoiles binaires qui, autrement, ne sont visibles que sous forme de taches diffuses par les télescopes terrestres à cause de l'atmosphère. En 2012, Jacopo Bertolotti, de l'Université d'Exeter au Royaume-Uni, et ses collègues s'en sont inspirés pour reconstruire l'image d'un objet placé derrière un écran diffusant, mais ils devaient pour cela éclairer l'objet avec un laser sous de multiples angles et analyser les corrélations entre l'intensité lumi-

neuse des taches correspondantes. Le processus, lent et fastidieux, prenait plusieurs heures, voire plusieurs jours.

Or, Katz, de l'équipe de S. Gigan, et ses collègues ont réussi à reconstruire l'image d'un objet à partir d'une seule image de la tache de diffusion, prise avec un simple téléphone portable ! Pour ce faire, ils ont étudié la luminosité enregistrée par les différents pixels : chacun recevant la lumière sous un angle différent, il est possible d'obtenir la même information que par la méthode de J. Bertolotti avec une seule photographie.

La rapidité de cette technique ouvre la voie à des applications en imagerie médicale, car elle permet de voir à travers un milieu mouvant. On pourrait ainsi visualiser des tissus biologiques ayant préalablement reçu un marquage fluorescent ou qui réfléchissent la lumière et sont éclairés de l'extérieur. La profondeur observable atteindrait plusieurs millimètres, pour une résolution micrométrique (de l'ordre de la taille d'une cellule).

Guillaume Jacquemont

O. Katz et al., *Nature Photonics*, vol. 8, pp. 794-790, octobre 2014

La technique développée permettrait de reconstruire l'image de l'objet qui se cache derrière une vitre diffusante (a). Une photographie de la tache de diffusion prise par un téléphone portable contiendrait assez d'informations pour cela (b, photographie d'un motif en X lumineux vu à travers un milieu diffusant). La figure c montre trois exemples de motifs originaux (image de droite) et reconstruits (image de gauche) après le passage de leur lumière par un milieu diffusant. Les barres d'échelle correspondent à 1,7 millimètre.

Chimie

L'ère de la nanoscopie optique

Eric Betzig, Stefan Hell et William Moerner ont été récompensés pour le développement de deux techniques de microscopie à fluorescence permettant de visualiser le vivant à l'échelle nanoscopique.

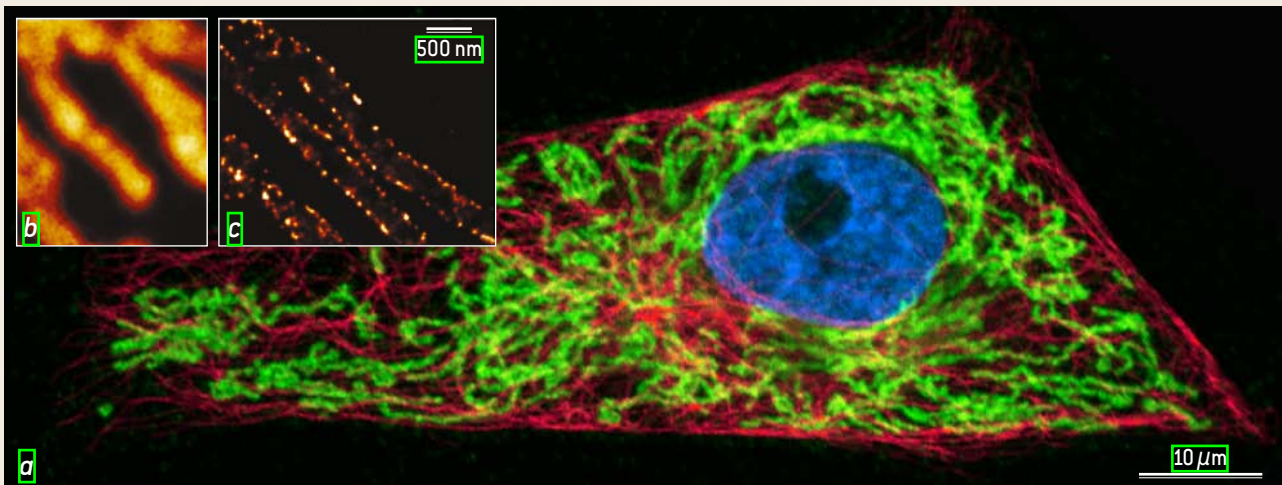


Image (a) : Microscopie à fluorescence. Image (b) : Microscopie à fluorescence. Image (c) : Microscopie à fluorescence.

Les mitochondries (a, en vert), les usines à énergie de la cellule, observées en microscopie STED avec le squelette de microtubules de la cellule (en rouge) et son noyau (en bleu). Les mitochondries vues par STED (c) apparaissent avec une résolution bien meilleure que celle des meilleurs microscopes à fluorescence classiques (b).

Aujourd'hui, le microscope optique est un outil incontournable du biologiste. Grâce à lui, on visualise des processus cellulaires aussi précis que le recrutement dynamique de calcium dans les neurones, le déplacement de molécules dans les cellules ou le devenir de protéines lors de la division cellulaire. Si de telles prouesses sont possibles, c'est en particulier grâce au développement d'une forme de microscopie, dite à fluorescence, où ce que l'on observe est la lumière produite à une certaine longueur d'onde par des molécules fluorescentes excitées à l'aide d'une source lumineuse (un laser en général).

La microscopie à fluorescence est utilisée depuis plusieurs dizaines d'années. Toutefois, avant les années 2000, il était impossible de distinguer deux structures distantes de moins de 200 nanomètres. Imposée par la nature ondulatoire de la lumière, cette limite fut décrite dès la fin du XIX^e siècle par le physicien allemand Ernst Abbe : le pouvoir de résolution est limité par la diffraction de la lumière. L'image d'un point par un microscope n'est pas un point, mais une petite tache circulaire qui masque les alentours du point.

Eric Betzig, du *Howard Hughes Medical Institute*, à Ashburn aux États-Unis, Stefan Hell, de l'Institut Max Planck de chimie biophysique de Göttingen, en Allemagne, et William Moerner, de l'Université Stanford, aux États-Unis, ont contourné cette limite par deux approches.

La première, nommée microscopie à déplétion par émission stimulée (microscopie STED), a été mise au point par S. Hell en 2000. Au lieu de simplement éclairer la zone à observer par un laser, ce qui excite toutes les molécules fluorescentes atteintes, S. Hell a eu l'idée de forcer toutes les molécules du champ éclairé à se désexciter, sauf celles situées au centre du champ, dans un volume de quelques nanomètres. Ce faisant, il impose que la région active soit inférieure à la limite de diffraction de Abbe, d'où une meilleure résolution. S. Hell utilise pour cela deux impulsions laser, l'une pour désexciter les molécules, l'autre pour déclencher la fluorescence des molécules au centre.

Quant à E. Betzig et W. Moerner, ils ont, indépendamment, posé les bases d'une nouvelle approche, la microscopie à l'échelle de la molécule unique, visant à

détecter les photons émis par chaque molécule fluorescente éclairée. En 1989, W. Moerner a montré qu'une telle détection est possible : ses collègues et lui ont observé, pour la première fois, la trace d'une molécule fluorescente unique dans un milieu dense (sous la forme d'un pic dans le spectre d'absorption de la lumière). Nombre de recherches ont été déclenchées par cette découverte, visant à améliorer la détection et à mettre au point une technique de microscopie intégrant le principe. E. Betzig, qui a participé activement à ces recherches, a ainsi été le premier, en 2006, à utiliser une telle méthode.

La microscopie à fluorescence de haute résolution n'en est qu'à ses débuts, mais progresse vite. Les deux principes récompensés sont déclinés sous de nombreuses formes, conduisant à autant de techniques toujours plus précises pour appréhender le vivant à l'échelle nanoscopique et suivre la dynamique des processus biologiques. Bientôt l'ère de la vidéonanoscopie en temps réel ?

Marie-Neige Cordonnier

http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2014/

10 nanomètres

C'est ce que distinguent

W. Moerner et ses collègues

par imagerie super-résolue

d'une petite molécule

à la surface d'une

bactérie vivante.*

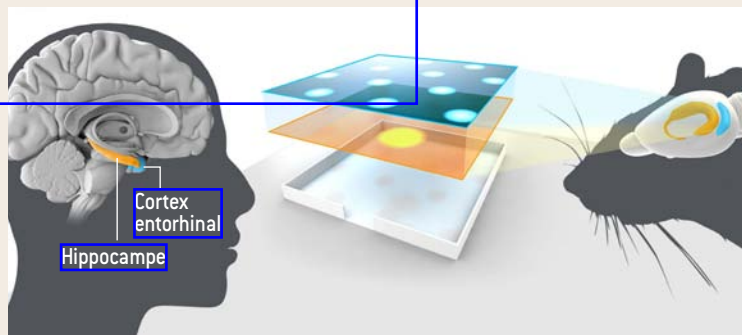
Physiologie-médecine

La découverte d'un « GPS cérébral »

Comment savons-nous où nous sommes ? Comment pouvons-nous déterminer le chemin d'un endroit à un autre ?

Et comment mémorisons-nous ces informations de façon à pouvoir retrouver immédiatement le chemin face à la même situation ? Les lauréats du prix Nobel de physiologie ou médecine 2014 ont mis en évidence dans le cerveau un « système de localisation » qui permet de s'orienter dans l'espace.

En 1971, l'Américano-Britannique John O'Keefe (aujourd'hui à l'*University College* de Londres) a découvert les premiers éléments de ce système de localisation. En utilisant des microélectrodes implantées dans le cerveau de rats, il a montré que certains neurones d'une aire cérébrale profonde nommée hippocampe étaient sélectivement activés quand l'animal était à un certain endroit dans une pièce. D'autres neurones étaient activés lorsque le rat était à d'autres endroits. J. O'Keefe en a conclu que ces « cellules de lieu » formaient un



Une cellule de lieu est un neurone qui s'active quand l'animal se trouve dans un endroit particulier (*en orange*). Une cellule de grille s'active pour un ensemble d'endroits, qui forment un maillage (*en bleu*).

© 2014. Une Nobel comme les autres K&A&B

plan cérébral de l'environnement où se trouvait l'animal.

En 2005, les Norvégiens May-Britt et Edvard Moser ont découvert un autre élément clé de ce système de localisation. Ils ont identifié des neurones qui définissent un système de coordonnées spatiales. Ces neurones, qualifiés de « cellules de grille », sont situés dans le cortex entorhinal, fortement connecté à l'hippocampe. Chacun s'active pour de multiples positions de l'animal dans l'environnement, régulièrement espacées et formant une grille à mailles hexagonales.

Par la suite, les époux Moser ont montré que les neurones de grille étaient connectés à d'autres neurones, codant par exemple l'orientation de la tête. Tous ces neurones envoient des terminaisons nerveuses dans l'hippocampe et interagissent avec les cellules de lieu pour former un système de navigation performant.

D'abord découverts chez les rats, les neurones de lieu et de grille ont ensuite été trouvés chez d'autres mammifères, dont l'homme. Les études sur ce dernier se fondaient notamment sur des microélectrodes implantées

dans le cerveau de patients épileptiques (chez qui on cherchait le « foyer épileptique », c'est-à-dire la zone d'où partaient les crises).

Les cellules de lieu pourraient représenter les endroits où l'on est, mais aussi ceux d'où l'on vient et ceux vers lesquels on va. Même s'ils ne codent pas directement les souvenirs, ils seraient essentiels à la mémoire spatiale. Dans la maladie d'Alzheimer, cette mémoire se dégrade d'ailleurs quand l'hippocampe se détériore.

**Philippe Ribeau-Gésippe
et Guillaume Jacquemont**

www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/2014/

Physique

Une récompense pour les LED bleues

La technologie de l'éclairage est révolutionnée par les diodes électroluminescentes, ou LED (pour *Light-Emitting Diodes*). Or cette révolution a été rendue possible par la mise au point, dans les années 1990, de LED émettant de la lumière bleue. En effet, on savait fabriquer des LED, dispositifs à base de semi-conducteurs, qui émettaient dans le rouge ou le vert, mais pas dans le bleu, ce qui empêchait de réaliser des lampes à LED émettant de la lumière blanche (obtenue par superposition de trois lumières colorées).

La réalisation de LED émettant dans le bleu est restée un

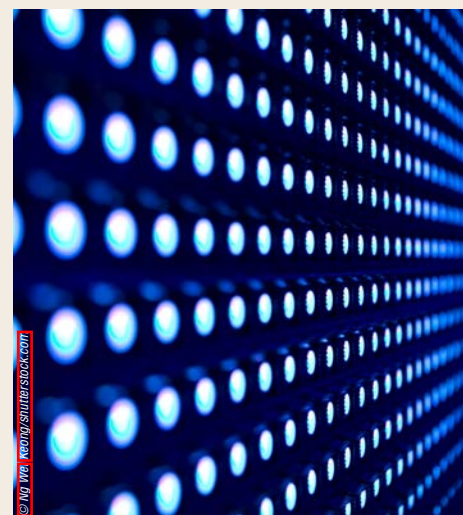
défi pour les scientifiques et ingénieurs pendant trois décennies. Le défi a finalement été relevé par Isamu Akasaki et Hiroshi Amano, à l'Université de Nagoya au Japon, et Shuji Nakamura, qui travaillait à l'époque chez *Nichia Chemicals*, une petite compagnie à Tokushima. Le Nobel leur revient.

La mise au point de LED blanches est un bouleversement pour l'industrie de l'éclairage, car ces nouvelles sources de lumière consomment très peu d'électricité par rapport aux autres sources. Le record le plus récent est un flux lumineux de 300 lumens par watt consommé, contre 16 lumens par watt pour les ampoules à incan-

descence et environ 70 lumens par watt pour les ampoules fluorescentes. Sachant que l'éclairage représente 20 à 25 % de la consommation mondiale d'électricité, le remplacement des sources actuelles par des LED permettra de réaliser de notables économies d'énergie. Qui plus est, les LED ont une durée de vie environ 100 fois supérieure à celle d'une ampoule à incandescence et 10 fois supérieure à celle d'une ampoule fluorescente, d'où des économies en coûts et en matériaux.

Maurice Mashaal

www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/



Les LED bleues nécessitent des semi-conducteurs à « gap » élevé, à l'origine des difficultés.

Les plus anciennes mains



L'art pictural est censé être né en Europe au Paléolithique supérieur, comme en témoignent de nombreuses grottes ornées. Toutefois, Maxime Aubert, de l'Université de Wallogong en Australie, et ses collègues viennent d'établir que des dessins de mains réalisés « au pochoir » découverts dans des grottes de l'île de Sulawesi, en Indonésie, datent d'environ 40 000 ans, ce qui en fait les plus anciennes œuvres figuratives connues de l'humanité. Ainsi, il y a quelque 40 000 ans, des hommes ou des femmes pratiquaient des arts picturaux figuratifs semblables aux deux extrémités de l'Eurasie.

Médecine

Des bactéries qui modulent l'appétit

Anorexie, boulimie... Les troubles alimentaires sont fréquents et constituent une véritable épidémie. Qu'est-ce qui dérègle à ce point notre comportement alimentaire ? L'équipe de Sergueï Fetissov, de l'Inserm (UMR 1073 Inserm/Université de Rouen) a mis au jour l'influence de certaines bactéries intestinales sur la sensation de faim.

Les biologistes ont montré que les colibacilles (*Escherichia coli*) de la flore intestinale fabriquent une protéine nommée ClpB, dont la structure est voisine de celle de la mélanotropine, une hormone impliquée dans la satiété. En présence de la protéine ClpB, le système immunitaire produit des anticorps pour la neutraliser, mais ces derniers se lient aussi à la mélanotropine et modifient son effet sur la satiété. Les biologistes ont ainsi constaté que le com-

portement alimentaire de souris changeait lorsqu'ils introduisaient des bactéries *E. coli* dans leur intestin. En revanche, des bactéries mutées qui ne fabriquaient pas la protéine ClpB n'avaient pas cet effet.

Les anticorps n'empêchent pas la mélanotropine d'agir, mais ils modifient ses interactions avec son récepteur cellulaire. Cela pourrait conduire tantôt à l'atténuation de la sensation de faim, tantôt à son augmentation. Les mécanismes, complexes, sont à l'étude.

Pour confirmer l'existence de ce phénomène chez l'homme, les biologistes ont effectué des prélèvements sanguins chez des patients souffrant de troubles alimentaires. Ces patients présentaient un taux anormalement élevé d'anticorps dirigés contre la protéine ClpB, ce qui suggère que ces anticorps sont liés à

la perturbation de la sensation de faim. En outre, la concentration d'anticorps variait de conserve avec la gravité des symptômes cliniques, identifiés grâce à un questionnaire standardisé.

G. J.

N. Tennoune et al., *Translational Psychiatry*, en ligne le 7 octobre 2014



Technologie

Un mur intelligent pour contrôler les ondes

Nous vivons aujourd'hui dans un monde connecté. Tous nos appareils – ordinateurs, téléphones, tablettes, etc. – exploitent des technologies sans fil, mais nous nous agaçons souvent d'avoir un signal trop faible ou erratique. L'équipe de Geoffroy Lerosey et Mathias Fink, de l'Institut Langevin à Paris (ESPCI ParisTech et CNRS), a mis au point un système qui pourrait grandement améliorer les performances des systèmes sans fil utilisant des micro-ondes, tel le Wi-Fi.

Lorsqu'un signal émis par une antenne se propage dans un bâtiment, il est réfléchi par

de nombreux obstacles – murs, meubles, etc. Ainsi, le signal capté par une antenne réceptrice est la somme des différentes ondes arrivant par des chemins variés. L'inconvénient est que ces ondes arrivent avec un certain déphasage les unes par rapport aux autres. Celui-ci influe sur l'intensité du signal et en moyenne, comme les déphasages sont aléatoires, le signal est dégradé et souvent d'amplitude faible.

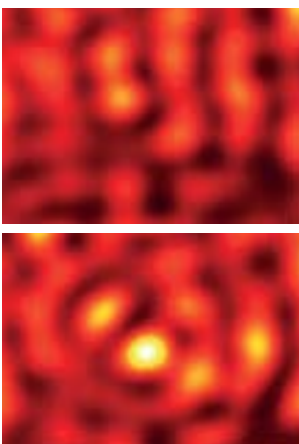
M. Fink et ses collègues ont développé un système qui recycle l'énergie électromagnétique incidente dans une pièce en augmentant l'amplitude du signal au point où se trouve le

récepteur. L'idée est d'introduire dans la pièce un miroir composé d'une centaine de réflecteurs qui corrigent le déphasage des différentes ondes réfléchies afin que l'intensité du signal soit maximale au niveau du récepteur.

Les chercheurs ont montré qu'ils peuvent multiplier l'intensité du signal reçu par un facteur proche de 10. Il est alors possible de diminuer la puissance de l'émetteur. De nombreux développements sont possibles : gérer plusieurs fréquences d'émission, plusieurs récepteurs...

S. B.

N. Kaina et al., *Scientific Reports*, vol. 4, article 6693, 2014



L'intensité du signal au niveau de l'antenne de réception sans le miroir (en haut) et avec (en bas).

Planétologie

Un volcanisme lunaire récent

Les géologues vont devoir réécrire une partie de l'histoire de la Lune. On pensait que l'activité magmatique de notre satellite s'était déroulée surtout il y a entre 3,9 et 1 milliards d'années. Une coulée basaltique, nommée Ina, avait été observée en 1971. Elle semblait récente, mais unique. Cependant, grâce à de nouvelles observations de la sonde *Lunar Reconnaissance Orbiter* (LRO), Sarah Braden, de l'Université d'État de l'Arizona, et ses collègues ont mis au jour 70 structures similaires et datées de moins de 100 millions d'années.

Pour les expliquer, il faut supposer que la Lune s'est refroidie plus lentement qu'on ne le pensait. D'autres éruptions pourraient avoir lieu, mais la probabilité d'assister à un tel spectacle est très faible!

S. B.

S. E. Braden et al., *Nature Geoscience*, en ligne le 12 octobre 2014

Paléontologie humaine

L'ADN de l'oncle d'Ust'-Ishim

Le plus ancien ADN d'homme moderne que nous connaissons provient d'un fémur sibérien. Cet os trouvé près du village d'Ust'-Ishim est daté de 45 000 ans. Une équipe internationale a montré que son génome contient environ 2 % d'ADN néandertalien, à peu près comme dans notre génome, mais en séquences plus longues. C'est logique, puisque l'homme d'Ust'-Ishim a vécu à une époque plus proche de celle du métissage des hommes modernes avec les Néandertaliens. Mais à quel point? Les chercheurs se sont appuyés sur une modélisation de l'érosion et de la dérive génétiques qui ont réduit la longueur des séquences d'ADN héritées des Néandertaliens, et sont parvenus à la conclusion que les ancêtres de l'homme d'Ust'-Ishim se sont mélangés avec les Néandertaliens il y a 60 000 à 50 000 ans environ, soit à peu près au moment de l'expansion majeure de *Homo sapiens* hors d'Afrique et du Proche-Orient.

François Savatier

Qiaomei Fu et al., *Nature*, vol. 514, pp. 445-449, 2014

Archéologie

Un trésor viking en Écosse

Si la loi ne les retenait pas, les chasseurs de trésors amateurs seraient des pillards comme les Vikings. Ce n'est pas le cas de Derek MacLennan qui, après avoir découvert des objets vikings enfouis depuis 1 000 ans dans un champ du district de Dumfries and Galloway, en Écosse, a immédiatement prévenu la *Treasure trove unit*.

Cette «équipe des découvertes de trésor», dirigée par Stuart Campbell, est un service public écossais chargé d'intervenir en cas de fouilles sauvages. Les archéologues sont donc venus poursuivre la fouille entamée, et ont mis au jour plusieurs dizaines d'objets en argent. L'un des plus notables est une croix pectorale ornée d'émaux du IX^e ou du X^e siècle, ayant appartenu à un dignitaire du clergé au Moyen-Âge. On reconnaît là

un butin viking typique! Lors de leurs raids, les Scandinaves visaient en effet prioritairement les riches monastères, d'autant que depuis la christianisation sanglante des Saxons et des peuples proches du Danemark par les Francs, ils haïssaient farouchement la religion chrétienne.

De quel monastère provient la croix pectorale? Difficile à dire, mais une étonnante découverte suggère que ce pourrait être d'un monastère carolingien. Les archéologues ont mis au jour un grand vase en argent. Décoré d'animaux, il renferme nombre d'objets entourés de textiles, qui seront révélés par radiographie avant d'être extraits. Selon les archéologues, il provient de la partie allemande de l'empire de Charlemagne.

F. S.



Parmi le butin viking exhumé, cette croix pectorale probablement carolingienne, accompagnée de sa corde en fils torsadés.

Nouvelle alerte climatique

Le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a publié une synthèse de son cinquième rapport le 2 novembre. Ses conclusions sont de plus en plus fiables et alarmantes. Si rien n'est fait, le réchauffement pourrait atteindre 4 °C d'ici la fin du siècle et avoir de multiples impacts négatifs, notamment sur la biodiversité et la sécurité alimentaire mondiale. Son origine anthropique est désormais probable à plus de 95 %. Cependant, il est encore temps d'agir, selon le GIEC.

Un ancêtre amphibie des ichtyosaures

Comment les reptiles terrestres ont-ils conquis les océans? Un fossile d'il y a environ 248 millions d'années découvert en Chine par Ryosuke Motani, de l'Université de Californie à Davis, et ses collègues pourrait être la clé. Il ressemble

à un ichtyosaure, ces reptiles marins disparus il y a 90 millions d'années, mais certains traits suggèrent qu'il pouvait se déplacer sur terre: des nageoires relativement larges et des poignets flexibles permettant de ramper, un museau court et des os plus épais que ceux des reptiles marins.

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



Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

POINT DE VUE

Quelle transition énergétique pour la France ?

Le projet de loi donne de bonnes orientations ; mais elles sont très ambitieuses quant aux réductions attendues des demandes d'énergie.

Patrick CRIQUI

Aboutissement d'une concertation nationale commencée à l'automne 2012, le projet de loi relatif à la transition énergétique pour la croissance verte a été adopté par le Parlement français le 14 octobre 2014 et doit être examiné par le Sénat. Parmi les cinq grands objectifs chiffrés de ce projet de loi (*voir ci-contre*), l'un d'eux est particulièrement ambitieux : la consommation d'énergie doit être réduite de moitié d'ici 2050. Or les moyens économiques, politiques et financiers mis en œuvre pour y parvenir ne sont pas à la hauteur.

Lors de la concertation, 16 scénarios avaient été retenus pour leur pertinence et leur cohérence, et quatre familles avaient été identifiées, correspondant à quatre trajectoires énergétiques : *Sobriété, Efficacité, Diversité, Décarbonisation* (*voir la figure*). C'est la trajectoire *Efficacité* qui a été retenue.

Pour les porteurs du scénario, dont l'Ademe (l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) qui l'a imaginé, l'objectif de réduction de la demande énergétique est atteignable en mobilisant toujours et partout, dans tous les secteurs concernés (rénovation thermique des bâtiments, développement des transports en commun et de véhicules moins énergivores, industrie), les technologies les plus efficaces. L'objectif est louable, mais on peut s'interroger sur sa faisabilité, car même si des progrès considérables ont été effectués depuis 40 ans – depuis le premier choc pétrolier –, il existe et existera toujours un écart entre l'efficacité énergétique optimale souhaitée et les résultats obtenus dans les systèmes réels.

Les cinq grands objectifs du projet de loi

- Une réduction des émissions de gaz à effet de serre de 40 % en 2030 et de 75 % en 2050 par rapport à 1990
- Une réduction de la consommation d'énergie de 25 % en 2030 et de 50 % en 2050 par rapport à 2012
- Une réduction de la consommation d'énergie fossile de 30 % en 2030 par rapport à 2012
- Une part des énergies renouvelables s'élevant à 23 % de la consommation en 2020, puis à 32 % en 2030
- Une part du nucléaire dans la production d'électricité réduite de 75 % à 50 % en 2025.

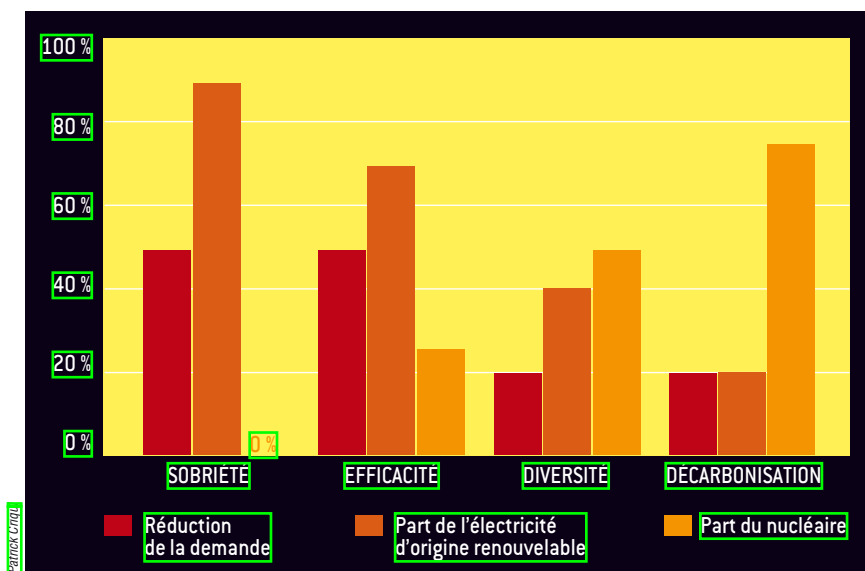
■ SUR LE WEB

Deux interviews de P. Cricqui sur la transition énergétique, parues l'une sur le site de Futuribles (bit.ly/1tuIAAt) et l'autre sur le site de Pour la Science (bit.ly/1s8paYU).

Trois facteurs en particulier expliquent cet écart. Premièrement, les acteurs économiques – les ménages et les entreprises – ne sont en général pas prêts à faire individuellement les investissements qui seraient nécessaires pour réduire la consommation énergétique globale, car le temps de retour de l'investissement est jugé trop élevé. Par exemple, en France, la facture énergétique moyenne d'un ménage pour le bâtiment est de 1 500 euros par an, soit environ 4 % de son budget. Pour économiser les deux tiers des consommations du bâtiment, soit 1 000 euros par an – ce qui correspond déjà à une rénovation très poussée –, les ménages vont accepter d'investir de l'ordre de 5 000 à 10 000 euros par logement, mais pas plus, alors que du point de vue de l'économie publique, des investissements de 15 000 à 20 000 euros resteraient justifiés.

En d'autres termes, les acteurs économiques ont des horizons de temps d'investissement courts. Leurs comportements correspondent ainsi à des calculs économiques dont les taux d'intérêt réels sont supérieurs à 15 %, alors que les solutions qui se justifieraient d'un point de vue collectif ont des taux d'intérêt relativement faibles (de l'ordre de 4 %).

Deuxièmement, pour des raisons historiques, on manque en France d'une culture et d'une expérience de la gouvernance territoriale de l'énergie. Les structures institutionnelles françaises sont telles que les collectivités locales n'ont pas toujours les marges de manœuvre qui leur permettraient de développer des stratégies intégrées pour le bâtiment, les systèmes



LES QUATRE TRAJECTOIRES énergétiques identifiées lors du débat national, à l'horizon 2050. *Sobriété* et *Efficacité* supposent une forte réduction (50 % par rapport à 2012) de la consommation d'énergie en 2050. Mais alors que *Sobriété* vise une sortie du nucléaire d'ici 2050 et revendique des comportements plus sobres de consommation, *Efficacité* garde une part significative de nucléaire dans la production d'électricité et envisage une réduction des consommations due avant tout aux avancées technologiques. *Diversité* et *Décarbonisation* conservent des parts de nucléaire plus importantes et sont moins ambitieuses pour la réduction des consommations.

de transport, le développement de systèmes énergétiques locaux, de chauffage urbain ou de récupération de chaleur. Cela découle des lois de nationalisation après la guerre et du fait que les collectivités se sont dessaisies des compétences de distribution de l'énergie, en particulier de l'électricité. Quelques-unes sont restées avec des régies locales, mais ce sont des exceptions en France, alors que c'est la règle dans les pays de culture germanique.

Cet élément est présent dans le projet de loi, mais il reste des pesanteurs institutionnelles importantes à vaincre. En particulier, il s'agit de construire un rapport différent entre les grands opérateurs de l'énergie (EDF, ERDF, Suez, GRDF...) et les collectivités locales, afin de faciliter l'aménagement urbain, le développement de systèmes de transport et la mobilisation des sources d'énergie locales.

Le troisième facteur est l'absence d'un signal-prix adapté, c'est-à-dire d'une façon de payer les émissions de carbone que l'on produit, qu'il s'agisse d'une taxe carbone

ou d'un autre système. Les déboires de la fiscalité énergétique, notamment l'abandon de l'écotaxe poids-lourds, font qu'il n'y a toujours pas moyen d'indiquer aux acteurs économiques les vrais coûts de la consommation des énergies fossiles pour la société.

Il manque en France une vision du rôle que pourrait avoir une fiscalité environne-

LES MÉNAGES ET LES ENTREPRISES
ne sont pas prêts à faire tous les investissements nécessaires pour réduire la consommation énergétique globale.

mentale pour rééquilibrer en profondeur la fiscalité dans son ensemble : les recettes potentielles d'une fiscalité environnementale sont importantes et permettraient d'alléger la fiscalité dans d'autres domaines, en particulier le travail. Le projet de loi d'introduction de la contribution climat-énergie qui avait été voté par le Parlement à l'automne 2009 donnait les moyens d'un tel rééquilibrage. Son annulation par le Conseil constitutionnel (deux jours avant son entrée en vigueur,

le 1^{er} janvier 2010) a été une occasion manquée de premier ordre.

Cependant, il ne suffirait pas d'introduire une fiscalité carbone. Des actions d'accompagnement seraient nécessaires. Notamment, il faudrait envisager de compenser l'augmentation des impôts des ménages en situation de précarité énergétique (le chèque vert du projet de loi de 2009, mais restreint aux ménages en précarité). De façon générale, la recette d'une fiscalité environnementale peut servir à trois choses : compenser auprès des ménages l'impôt énergétique qu'ils ont payé, alléger le poids des autres fiscalités et financer des investissements de transition énergétique. L'arbitrage est ici fondamentalement politique.

Pour toutes les raisons évoquées, le scénario *Efficacité* semble difficile à atteindre en France. Par conséquent, il faudra un suivi attentif et continu des résultats, des difficultés et de la manière dont on peut lever ces dernières. On sera peut-être conduit, dans cette gestion dynamique de la transition, à adopter des objectifs de réduction de la demande moins ambitieux, mais en compensant cet ajustement par une offre « décarbonée » (c'est-à-dire, en France, une offre d'énergies renouvelables et nucléaire) plus grande. Certains pays considèrent comme une solution majeure la capture et la séquestration du dioxyde de carbone émis. Compte tenu de la capacité de la France à gérer la production nucléaire, développer cette stratégie n'est sans doute pas la meilleure option pour notre pays. Garder une part de nucléaire un peu plus importante tout en poursuivant le développement des énergies éolienne et solaire serait plus judicieux.

La part du nucléaire après 2025 reste d'ailleurs un point aveugle du projet de loi. Le scénario *Efficacité* suggère que le nucléaire continuerait à diminuer après 2025 pour atteindre 25 % de la production énergétique en 2050. Mais ni l'Ademe ni le projet de loi ne se prononcent explicitement sur ce point. La question reste entière...

Patrick CRIQUI est économiste au laboratoire Pacte-Edden (CNRS, Université Pierre-Mendès-France), à Grenoble.

ENTRETIEN

Publication scientifique : vers l'accès ouvert institutionnel ?

Entretien avec Denis JEROME

Le système de publication des travaux scientifiques, fondé sur l'évaluation des articles par des pairs (relecteurs spécialistes anonymes), est en crise. Les coûts d'abonnements n'ont cessé d'augmenter ces dernières décennies, au point de devenir insupportables pour les laboratoires et les universités. En outre, l'accès payant aux articles publiés freine la diffusion des avancées

scientifiques, pourtant indispensable à l'activité des chercheurs. Diverses solutions pour mettre en place un accès libre, ou *open access*, aux publications ont été proposées depuis le début des années 2000. Il en est ainsi du modèle « vert » (libre accès après un embargo de durée variable) ou du modèle « doré » (report des coûts de publication du lecteur vers l'auteur, en échange de l'accès libre). Mais

ces solutions sont encore loin d'être satisfaisantes. Dans un rapport paru le 24 octobre 2014, l'Académie française des sciences prône l'évolution vers un nouveau modèle : un système d'*open access* institutionnel, où les coûts de publication seraient mutualisés et négociés au niveau national, en échange d'un accès libre aux articles. Denis Jerome, président de la Section de physique, nous explique la teneur de ce projet.



POUR LA SCIENCE

Pourquoi le modèle actuel de la publication scientifique n'est-il plus satisfaisant ?

DENIS JEROME : L'un des piliers de l'activité scientifique est l'examen critique des travaux des chercheurs par des rapporteurs spécialistes du domaine et anonymes, avant leur publication. Les éditeurs scientifiques jouent ainsi un rôle vital dans le processus de validation et de diffusion des résultats scientifiques. Cependant, depuis des années, les tarifs d'abonnements à ces revues ont explosé : une souscription annuelle à une revue de chimie coûte en moyenne 4 450 dollars ! Les éditeurs tirent parti du fait que les universités et les laboratoires sont une clientèle captive. Mais cette situation économique est devenue intenable.

PLS

Qu'est-ce qui justifie ces coûts ?

D. J. : L'organisation des lectures et l'édition des articles représentent un réel travail, qui

mérite salaire. Mais bien que les chiffres précis soient difficiles à établir, on estime à 105 millions d'euros par an les frais d'abonnement en France. Ramenés aux quelque 100 000 articles publiés, cela équivaut à des frais d'environ 1 000 euros par article. Le marché de l'édition scientifique, qui pèse sept à dix milliards d'euros au niveau mondial, réalise dans certains cas des marges de plus de 30 pour cent ! Dès lors, on peut légitimement se demander si de tels coûts sont justifiés, alors même que l'avènement des technologies numériques a facilité le travail des éditeurs.

Ils sont d'autant plus inacceptables que les publications scientifiques sont en quelque sorte payées trois fois par des fonds publics : des chercheurs produisent le contenu des articles et les rédigent, d'autres chercheurs les expertisent – bénévolement – et, enfin, d'autres encore les achètent ! Par ailleurs, les prix devenus prohibitifs sont un frein à la circulation de l'information scientifique, indispensable au travail des chercheurs. D'autres modèles plus équitables doivent être mis en place.

PLS

L'avènement du numérique a justement permis l'émergence de nouveaux modèles ces dernières années. Sont-ils une solution ?

D. J. : Internet et la publication numérique ont en effet considérablement facilité et accéléré la diffusion des connaissances. Cette évolution laisse entrevoir, à court terme, la possibilité d'un accès gratuit pour toute la communauté scientifique à l'ensemble des publications. Cet objectif est d'ailleurs soutenu par les pouvoirs publics des grandes nations scientifiques.

Le premier modèle fondé sur ce principe d'accès libre est celui des archives ouvertes. Il consiste à déposer les articles – avant publication dans une revue, ou après levée de l'embargo – sur des serveurs Internet accessibles à tous, sur le modèle du portail arXiv, lancé en 1991 au Laboratoire américain de Los Alamos. Cependant, en l'absence de validation par les pairs, les prépublications sur des archives ouvertes ne présentent aucune garantie de sérieux. Et

même en faisant l'économie de cette validation, les articles potentiellement pertinents sont noyés dans la masse de publications dénuées d'intérêt.

PLS

Des stratégies d'accès libre avec validation des articles existent cependant...

D. J. : Deux modèles d'accès libre répondant aux exigences scientifiques ont été formalisés dès 2002 : le modèle « vert » et le modèle « doré ».

L'accès vert consiste à mettre les articles publiés dans des revues en accès libre sur les serveurs des éditeurs ou sur un serveur institutionnel après un certain délai [de 6 à 18 mois selon les cas]. En France, le CNRS a par exemple lancé en 2000 le serveur HAL (Hyper Articles en Ligne), qui propose des publications essentiellement en mathématiques et en chimie. HAL a aussi vocation à assurer la pérennité des informations scientifiques indépendamment des éditeurs. Le modèle vert va dans le sens des recommandations de la Commission européenne, qui a demandé en juillet 2012 aux États membres de définir une politique « pour un meilleur accès aux informations scientifiques ».

Cependant, cette solution n'est que partiellement satisfaisante. La durée de l'embargo est très longue, alors que pour le bon fonctionnement de la science, la diffusion des informations devrait être immédiate. Et la suppression de ce délai est impossible pour des raisons évidentes de survie économique des éditeurs. Par ailleurs, ce modèle ne résout pas le problème des coûts d'abonnement excessifs.

L'autre modèle, l'accès « doré », consiste à reporter les coûts du lecteur vers l'auteur. L'auteur – ou plutôt son institution – paie pour publier, mais en contrepartie, l'article est en accès libre immédiatement. Le prix varie de 700 à 7000 euros par article. De telles sommes sont-elles justifiées ? Quoi qu'il en soit, la voie dorée pose la question de l'accès aux publications scientifiques pour les universités les moins bien dotées ou celles des pays pauvres. Et dans la mesure où il n'y a aucun contrôle des prix et que les auteurs sont isolés face aux éditeurs, comment s'assurer que les frais de publication restent acceptables ? De fait, le modèle doré a favorisé l'apparition de « revues prédatrices », qui pratiquent des tarifs bas, mais offrent une expertise défailante. Ces

revues profitent du fait qu'il est vital pour un chercheur de publier pour être évalué.

Evoquons pour terminer le modèle hybride, qui consiste à faire payer l'auteur pour rendre l'accès à son article libre dans une revue par ailleurs payante. Mais ce système intermédiaire revient à payer deux fois !

PLS

Que préconise alors l'Académie des sciences pour dépasser ces modèles existants ?

D. J. : L'Académie propose de développer un modèle d'accès libre à négociation centralisée, ou accès ouvert institutionnel (IOA). Il s'agit pour l'essentiel d'étendre le modèle doré, mais en imposant une négociation centralisée des charges. L'intégralité des budgets d'abonnement de la recherche publique serait ainsi basculée vers des aides à la publication dans des revues à accès libre.

Comme il est compliqué de redistribuer les crédits alloués à chaque laboratoire pour les abonnements en aides aux frais de publications, et aussi pour éviter que chaque auteur demeure isolé face aux éditeurs, il faudrait centraliser la négociation et établir une sorte de « licence globale », avec un abonnement forfaitaire annualisé négocié entre les pouvoirs publics



105 MILLIONS D'EUROS par an : c'est ce que représentent les coûts d'abonnement aux revues scientifiques pour les laboratoires et les universités en France. Il s'agit d'une clientèle captive, l'accès aux résultats récents étant indispensable aux chercheurs.

Les épijournaux : le projet Épisciences

En marge de l'accès libre vert ou doré, il existe une voie qui se développe autour des archives ouvertes : les épijournaux. Il s'agit de rendre gratuits la soumission et l'accès aux articles, et de mettre en place un processus de validation calqué sur celui des revues classiques (relecteurs anonymes, etc.), mais dématérialisé et automatisé.

Les articles acceptés sont reversés sur leur archive ouverte avec le label de l'épijournal qui les a approuvés.

Le coût de fonctionnement des épijournaux est laissé à la charge des institutions scientifiques responsables. Il devrait

rester modeste, du fait de la dématérialisation et de l'automatisation des procédures (ouverture de canaux de communication anonymes entre les auteurs et les rapporteurs, mise à jour automatisée des bases de données et des

sites des revues, mise aux normes des articles assurées par les laboratoires, etc.).

Ce modèle existe déjà dans la communauté des mathématiciens, par exemple avec l'*Electronic Journal of Probability* ou *Documenta Mathematica*.

Le projet Épisciences, initiative commune du CNRS et de l'Inria pilotée par le Centre pour la communication scientifique directe (CCSD), vise à mettre en œuvre un grand nombre d'épijournaux dans toutes les disciplines, autour des archives

ouvertes arXiv et HAL. La plateforme Épisciences, en service depuis début 2014, permet une gestion automatisée des épijournaux. L'Inria y assure déjà la publication de plusieurs revues d'informatique (DMTCS, JDMDH). En mathématiques, après plusieurs annonces en 2013, l'ouverture de la plateforme est imminente.

Cependant, si Épisciences devait gagner en envergure, il faudrait sans doute faire appel à des contributions des institutions.

et chaque éditeur. Le consortium *Couperin*, qui gère déjà la majorité des abonnements publics en France, pourrait endosser le rôle d'interlocuteur unique des éditeurs.

PLS

Quels sont les avantages de ce modèle d'accès ouvert institutionnel ?

D. J. : Tout d'abord, de répondre à l'objectif d'accès libre et immédiat pour tous aux publications scientifiques validées, un objectif à la fois éthique et moral. Ensuite, une clarification et une maîtrise des coûts, la négociation se faisant avec un acteur unique au niveau national, sur la base d'un montant bien identifié entre « grands » éditeurs et « grands » consommateurs. Il faut noter que les éditeurs ne sont pas lésés, la transition des crédits d'abonnement vers les crédits de publication se faisant à budget constant (environ 100 millions d'euros).

Enfin, ce système implique l'établissement d'une liste de revues homologuées, participant à l'accord global, dont seraient exclues les revues prédatrices et celles ayant une politique de profit trop prononcée. Bien sûr, les chercheurs resteraient libres de publier dans les revues homologuées de leur choix. Il faudra prévoir des aides, limitées, pour que les scientifiques puissent publier des articles dans certaines revues ne souhaitant pas ou ne pouvant pas rentrer dans la licence globale.

BIBLIOGRAPHIE

Les nouveaux enjeux de l'édition scientifique, Rapport de l'Académie des sciences, octobre 2014 (<http://bit.ly/1tgG4ZD>).

Ch. Berthaud et A. Magron, *La science accessible à tous*, Pour la Science n° 433, novembre 2013 (<http://bit.ly/pls443-openaccess>).

M. Mashaal, *La fronde des chercheurs contre Elsevier*, pourlascience.fr, février 2012 (<http://bit.ly/fronde-elsevier-112012>).

Le serveur d'archives ouvertes Arxiv : <http://arxiv.org/>

Le serveur d'archives ouvertes HAL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/>

Les revues électroniques ouvertes Revues.org : <http://www.revues.org/>

La plateforme d'épijournaux Épisciences : <http://episciences.org/>

PLS

Dans cette solution, n'y a-t-il pas un manque à gagner pour les éditeurs ?

D. J. : En effet, l'industrie et les services sont des gros lecteurs, mais publient peu. Si l'accès ouvert est mis en place, ces secteurs n'apporteraient plus de revenus aux éditeurs. Il serait juste que ce manque à gagner soit prélevé dans le crédit d'impôt recherche, puisque c'est une aide financière nette fournie au secteur privé.

PLS

Cet accès libre institutionnel paraît difficile à mettre en place au seul niveau national. Qu'en est-il des autres pays ?

D. J. : La France pourrait montrer l'exemple. Si elle ne détient qu'une part modeste dans l'édition scientifique, elle représente un poids important dans la production de connaissances. Même si la France commençait seule, cela améliorerait la visibilité de la recherche française. Prenons exemple sur l'Allemagne, qui a mis en place un système analogue entre l'Institut Max Planck et l'éditeur Springer. L'Autriche étudie un tel dispositif avec l'*Institute of Physics* britannique. L'avantage de l'accès ouvert est si évident qu'il devrait faire boule de neige. Quand le centre de gravité des publications aura basculé, les autres pays suivront. ■

Propos recueillis par Philippe Ribeau-Gésippe

Actuellement
en kiosque

DOSSIER POUR LA SCIENCE

LE CERN FÊTE SES 60 ANS

De l'atome à l'Univers :
une exceptionnelle
aventure scientifique
et humaine



DOSSIER POUR LA SCIENCE - PHYSIQUE DES PARTICULES - ANTIMATIÈRE - SUPERSYMETRIE

AVANT-PROPOS
D'ÉTIENNE KLEIN

Cent ans de particules... Où va la physique?

LE BOSON DE HIGGS
par François Englert,
l'un des « pères »
de cette particule

LA NOUVELLE QUÊTE
Les pistes théoriques
pour dépasser
le Modèle standard



N° 85 Octobre-Décembre 2014

purlascience.fr

**NOUVELLE
formule**

n° 85 - 120 pages - prix de vente: 6,95 €

www.purlascience.fr

Le site de référence de l'actualité scientifique internationale



Disponible sur



Le goût de l'intelligence

par Richard Taillet, sur Signal sur bruit

Début octobre 2014 se tenait au centre culturel *La Turbine*, non loin d'Annecy, la deuxième édition d'*Imaginasciences*, une manifestation consacrée à l'image scientifique et à son rôle dans la vulgarisation de la science auprès des jeunes. Ce fut l'occasion de nombreux échanges constructifs avec des cinéastes, pédagogues, enseignants,

En ce qui concerne la première facette, il est évidemment plus facile d'interpeller un public en l'amusant ou en le faisant rêver, mais il faut prendre garde à ne pas le tromper en le faisant rêver d'autre chose. Il est très facile d'amener le public à s'émerveiller devant de belles images d'astronomie ou devant l'immensité de l'Univers. Cet émerveillement peut amener des jeunes à se tourner

pourquoi pas, de viser les performances des champions d'athlétisme ou des musiciens professionnels. Il y a un énorme plaisir dans le fait de se confronter à des difficultés intellectuelles, buter devant un problème, s'y atteler, le sentir résister, puis céder, puis reprendre le dessus, jusqu'au moment où on a l'impression d'y avoir compris quelque chose – cette impression étant rarement

définitive.

La science, pour moi, a ce goût-là. Pas l'ivresse du pouvoir que confère le savoir, ni l'humilité du doute permanent (ce quelle n'est d'ailleurs pas), mais le goût de l'intelligence. Être capable de défendre une affirmation, de la confronter à une affirmation contraire, d'une façon qui ne fasse pas appel à des croyances ou à un rapport de force, mais à notre intelli-

gence du monde et des lois qui le régissent. Et aussi comprendre les limites de cette attitude en évitant un scientisme qui y engloberait toute la pensée humaine et, à l'autre extrémité du spectre, un relativisme douteux qui la viderait de son contenu. C'est ce qu'il est important de transmettre et, surtout, de montrer. ■



La diffusion de la science auprès du grand public passe souvent par l'émerveillement. Trop ?

chercheurs, programmeurs, éditeurs, etc. Un point de vue semblait dominer : pour que la vulgarisation scientifique « fonctionne », il faut amuser ou émerveiller son public, et surtout ne pas l'assommer avec des choses complexes. Je suis en désaccord avec cette vision de la vulgarisation.

Première difficulté, qu'est-ce qu'une vulgarisation réussie ? La diffusion des connaissances scientifiques recouvre au moins deux activités bien distinctes. Dans certains cas, il s'agit d'amener vers les sciences un public qui s'en désintéressait, de lui en donner le goût pour qu'ensuite, de lui-même, il aille plus loin. Mais dans d'autres cas, il s'agit d'expliquer des concepts à un public *a priori* déjà intéressé, en s'affranchissant de certains aspects techniques, pour extraire les concepts scientifiques du cadre formel qui a servi à les élaborer.

vers les sciences, mais ils passent à côté de l'essentiel. Et ils risquent de se sentir floués quand ils se lanceront dans une véritable activité scientifique. Ce qui émerveille le chercheur, c'est surtout le fait que l'Univers peut être décrit par un ensemble de lois, généralement exprimées sous forme mathématique, et que cette description permet de comprendre les phénomènes physiques – expliquer ce qui s'est passé et prévoir ce qui va se passer. C'est là qu'est le véritable plaisir du scientifique. Or ce plaisir est généralement le fruit d'un long labeur.

Cela m'amène à ma deuxième objection : la complexité n'est pas synonyme d'ennui, ni la facilité gage d'amusement. Faire du saut en hauteur avec une barre à 15 centimètres du sol ou jouer *Au clair de la lune* au piano perdent rapidement tout intérêt si l'on n'essaie pas d'aller plus loin et,

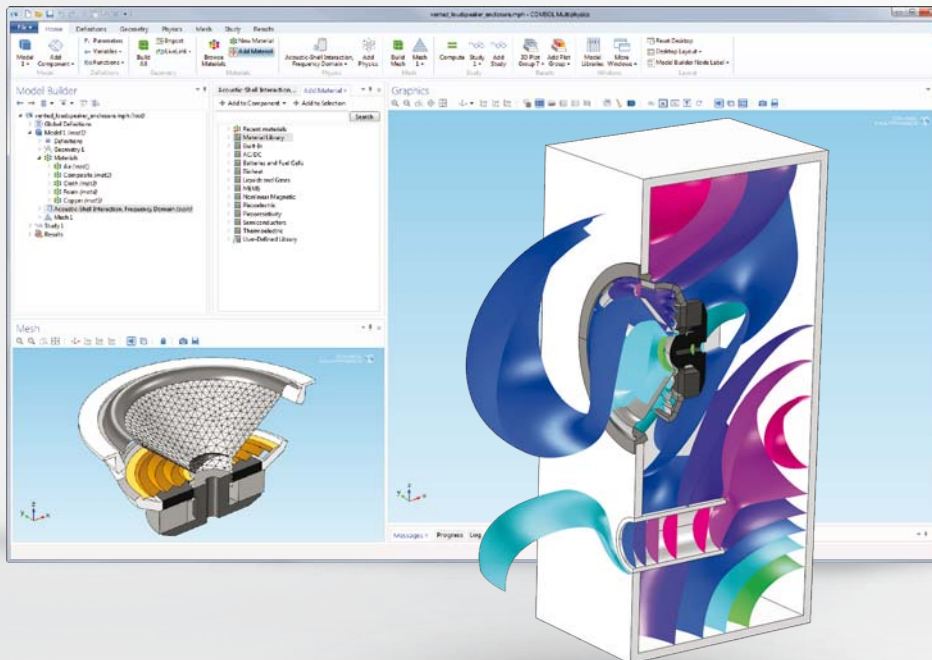


Richard TAILLET est professeur à l'Université Savoie Mont Blanc et chercheur au Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique théorique (LAPTh). Il est l'auteur du blog Signal sur bruit (www.scilogs.fr/signal-sur-bruit).



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

ENCEINTE ACOUSTIQUE: Ondes de pression émises par un haut-parleur. Ce modèle couple l'électromagnétisme dans la bobine, la mécanique des structures dans la membrane ainsi que l'acoustique à l'intérieur et autour de l'enceinte.



TESTEZ ET OPTIMISEZ VOS DESIGNS AVEC **COMSOL MULTIPHYSICS®**

Nos outils de simulation multiphysique intègrent tous les effets physiques du monde réel. De ce fait, ils reproduisent avec précision le comportement de vos designs. Pour en savoir plus sur COMSOL Multiphysics, rendez-vous sur www.comsol.fr

Product Suite

COMSOL Multiphysics

ELECTRICAL

AC/DC Module
RF Module
Wave Optics Module
MEMS Module
Plasma Module
Semiconductor Module

MECHANICAL

Heat Transfer Module
Structural Mechanics Module
Nonlinear Structural Materials Module
Geomechanics Module
Fatigue Module
Multibody Dynamics Module
Acoustics Module

FLUID

CFD Module
Mixer Module
Microfluidics Module
Subsurface Flow Module
Pipe Flow Module
Molecular Flow Module

CHEMICAL

Chemical Reaction Engineering Module
Batteries & Fuel Cells Module
Electrodeposition Module
Corrosion Module
Electrochemistry Module

MULTIPURPOSE

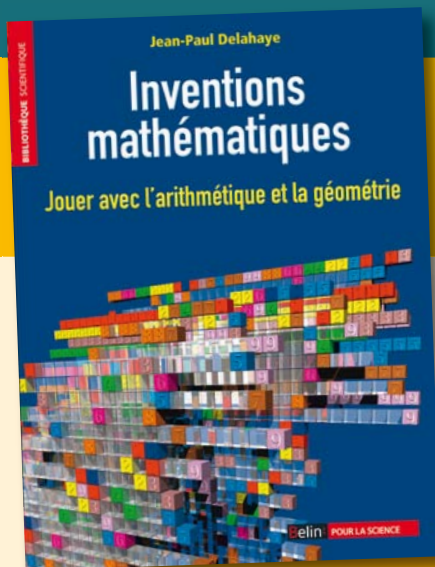
Optimization Module
Material Library
Particle Tracing Module

INTERFACING

LiveLink™ for MATLAB®
LiveLink™ for Excel®
CAD Import Module
ECAD Import Module
LiveLink™ for SolidWorks®
LiveLink™ for Inventor®
LiveLink™ for AutoCAD®
LiveLink™ for Creo™ Parametric
LiveLink™ for Pro/ENGINEER®
LiveLink™ for Solid Edge®
File Import for CATIA® V5

L'univers mathématique

de Jean-Paul Delahaye



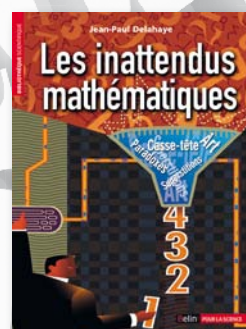
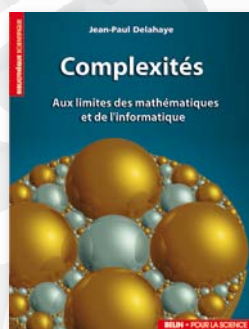
NOUVEAU !

Inventions mathématiques

Jouer avec l'arithmétique et la géométrie

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

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



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

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

POUR LA
SCIENCE

Pour commander ces ouvrages,
rendez-vous sur www.pourlascience.fr

HOMO SAPIENS INFORMATICUS chronique de Gilles Dowek

Homo habilis hypercapitalisticus

Pour construire une usine de circuits intégrés, l'État ne suffit plus : il faut des millions d'investisseurs.



Un « investissement » est un acte par lequel on renonce à consommer quelque chose aujourd'hui afin de produire et consommer davantage demain. Les dictionnaires d'économie nous donnent tous le même exemple : un Robinson qui, seul sur son île, consacre une journée de travail à la fabrication d'un filet, au lieu de la passer à pêcher à la ligne. Ce Robinson investit, car il renonce au produit d'une journée de pêche, afin de pouvoir, quand son filet sera terminé, pêcher davantage de poisson avec moins d'efforts.

Homo habilis, qui est le premier hominidé à avoir fabriqué des outils, est aussi le premier à avoir investi, car fabriquer un outil consiste précisément à consacrer du temps de travail à la fabrication d'un objet qui permettra, par la suite, d'en produire d'autres à moindre coût.

Ce que l'on renonce à consommer aujourd'hui constitue le « capital investi » et on peut classer différentes activités productives – la pêche au filet, la fabrication de céramiques, la fabrication de voitures, etc. – en fonction du capital qu'elles demandent d'investir. Dans ce classement, la fabrication des circuits intégrés, dont sont faits nos ordinateurs, constitue une sorte de record : le coût de la construction d'une usine qui fabrique de tels circuits se mesure en milliards, voire dizaines de milliards, d'euros, alors que celui d'une usine de voitures, par exemple, ne se mesure qu'en dizaines ou centaines de millions.

Et plus les circuits sont miniaturisés, plus le coût de l'usine est élevé. De ce fait, il n'y a dans le monde qu'un petit nombre d'usines capables de fabriquer les circuits les plus miniaturisés que l'on sache réaliser aujourd'hui – dans lesquels la grille d'un transistor mesure moins de 32 nanomètres : six aux États-Unis, quatre à Taïwan, deux en Europe – l'une à Dresde (Allemagne) et l'autre à Crolles (France) –, une en Corée du Sud et une en Israël.

Pour rentabiliser un tel investissement, ces usines doivent produire beaucoup de

L'augmentation du coût des outils que nous fabriquons est peut-être l'une des raisons pour lesquelles le secteur de la finance a pris autant d'importance.

circuits, si bien que, en général, elles ne les conçoivent pas elles-mêmes. D'autres entreprises le font et leur communiquent les plans des circuits à fabriquer dans un langage spécial, un « langage de description de matériel ». Il n'est pas possible de modifier ces plans après avoir fabriqué et testé les premiers circuits, si bien que ces plans ne doivent comporter aucune erreur au départ.

Le coût élevé des usines de circuits intégrés n'est pas un phénomène isolé : tout au long de l'histoire des techniques, on n'a cessé de fabriquer des outils de plus en plus élaborés et de plus en plus chers, pour arriver à ces outils qui exigent de beaucoup renoncer à consommer aujourd'hui,

pour produire et consommer beaucoup plus demain. Nous sommes ainsi devenus des *Homo habilis hypercapitalisticus* : nous appartenons à une espèce qui non seulement fabrique des outils, mais, de plus, fabrique des outils très chers.

Un pêcheur pouvait investir seul dans la fabrication d'un filet, une famille dans la construction d'une fabrique de céramiques, un État dans celle d'une usine de voitures. Mais construire une usine de circuits intégrés dépasse les capacités d'investissement d'une personne, d'une famille ou même d'un État : il faut que plusieurs millions de personnes investissent ensemble, ce qui demande une certaine coordination.

Cette coordination est aujourd'hui apportée par le secteur de la finance et l'augmentation du coût des outils que nous fabriquons est peut-être l'une des raisons pour lesquelles ce secteur

a pris une telle importance.

Le pouvoir qu'il a pris sur nos existences est souvent critiqué ; mais ces critiques, pour justes qu'elles soient, resteront inefficaces tant que l'on n'inventera pas de nouvelles méthodes de coordination des investissements, afin de continuer à fabriquer des circuits intégrés sans subir ce pouvoir excessif. Et il n'est pas certain que les entreprises de financement collaboratif telles que *KissKissBankBank* soient une réponse à la mesure du problème. ■

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

CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES par Gérald Bronner



Une question de taille

Parce que la gestion de nos achats alimentaires exige des efforts cognitifs importants, nous les évaluons mal et gaspillons. Une solution consisterait-elle à réduire la taille des contenants ?

Il y a des secteurs économiques qui ne connaissent pas la crise. C'est notamment le cas du self-stockage : des entreprises proposent des surfaces de un à plusieurs dizaines de mètres carrés pour entreposer des objets. La personne qui les loue peut y accéder à tout moment pour déposer « provisoirement » des objets électroménagers ou des meubles dont elle n'a pas l'usage ou qu'elle possède en plusieurs exemplaires. En quelques années, le nombre de ces entreprises a plus que doublé en France. Aux États-Unis, en 2010, leur chiffre d'affaires s'élevait à 20 milliards de dollars, soit dix fois plus que celui de Facebook.

Elles proposent en quelque sorte d'éponger notre trop-plein de consommation. Leur vitalité, à ce titre, peut être considérée comme un des symptômes du gâchis dont se rendent coupables nos sociétés. Si l'on ajoute à cela qu'un tiers des produits dont nous garnissons nos réfrigérateurs finiront à la poubelle, ce gaspillage prend facilement les atours d'un scandale moral. Pourquoi faut-il donc que nous emplissions nos réfrigérateurs de cette façon ? Sans doute parce que l'activité qui consiste à faire des courses est fastidieuse et que nous souhaitons nous en acquitter « une fois pour toutes », qu'elle soit hebdomadaire ou mensuelle.

En outre, surveiller arithmétiquement les dates de péremption des produits que nous achetons et évaluer avec justesse nos besoins futurs constituent des activités dont la complexité excède les efforts mentaux que nous sommes prêts à consentir. Cela n'éclaire que

partiellement les raisons qui nous conduisent à ces excès. Il faudrait y ajouter le fait que nous sommes peu compétents pour évaluer nos propres désirs, notamment en termes d'alimentation. Dans une société qui fournit de la nourriture en quantité industrielle, le risque du gâchis représente moins pour nous que la peur de ne pas satisfaire nos désirs possibles.

Dans ces conditions, comment faire ? Nous pouvons compter sur la vertu des individus, leur expliquer combien cette gabegie est moralement problématique, et miser sur une autorégulation du désir. Il faut reconnaître qu'il n'y a pas beaucoup d'exemples où de telles entreprises aient fonctionné durablement et dans une société dans son ensemble. On peut encore manier le bâton et imaginer des lois coercitives (ticket d'alimentation, hausse des prix, etc., qui puniraient prioritairement les plus pauvres), mais chacun reconnaîtra que ce type d'actions est peu souhaitable.

Une étude récente fournit une piste d'un autre genre. Elle montre que les individus ont tendance à manger presque tout le contenu de leur assiette lorsqu'ils se servent eux-mêmes. Un peu plus pour un repas (92,8 pour cent) que pour une simple collation (76,1 pour cent), plus aussi s'ils se concentrent sur leur mets (97,1 pour cent) que si on les distrait (88,8 pour cent). Mais, en moyenne, ils mangent 92 pour cent du contenu de leur assiette.

Dans une certaine limite, ce n'est donc pas le volume global de ce qui est mangé

qui importe. C'est plutôt l'impression que ressent le consommateur d'avoir « honoré » son repas. Dans ces conditions, deux solutions sont possibles qui relèvent d'une approche volumétrique du problème. Soit l'on imagine des contenants infinis et l'on

Il faut veiller à ce que la concurrence, nécessaire dans une économie de marché, n'élargisse pas jusqu'au déraisonnable le domaine du possible consumériste.

suppose que la notion de « à chacun selon ses besoins » prévaudra. Soit on réduit la taille des assiettes. Seule la seconde solution étant envisageable, on imagine qu'en accord avec l'industrie, nombre de nos objets du quotidien pourraient être revisités pour inciter à une frugalité raisonnable sans qu'il soit nécessaire de promulguer des lois liberticides ou d'espérer d'improbables conduites vertueuses. Et pourquoi ne pas réduire aussi la taille moyenne des réfrigérateurs ?

Notre nature paraît ainsi faite que nous chercherons toujours à remplir le vide que notre espace privé met à notre disposition. Gérer ces espaces vides est une question politique : il faut veiller à ce que la concurrence, nécessaire dans une économie de marché, n'élargisse pas jusqu'au déraisonnable le domaine du possible consumériste. ■

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

**Pour la vie sur Mars,
on ne sait pas encore.
Pour les cinq vies
du papier, c'est sûr.**

La force de tous les papiers, c'est de pouvoir être recyclés
au moins cinq fois en papier. Cela dépend de chacun de nous.
www.recyclons-les-papiers.fr

Tous les papiers ont droit à plusieurs vies.
Trions mieux, pour recycler plus !



La presse écrite s'engage pour le recyclage
des papiers avec Ecofolio.



Le trou noir à l'origine du Big Bang

Le Big Bang et l'Univers qui en est issu pourraient être la conséquence de la formation d'un trou noir dans un espace à quatre dimensions.
Ce scénario résoudrait certaines difficultés de la cosmologie.

Niayesh Afshordi, Robert Mann
et Razieh Pourhasan



L'ESSENTIEL

■ Les cosmologistes ont reconstitué l'histoire précise de l'Univers. Mais quelques questions fondamentales n'ont pas trouvé de réponses.

■ L'un de ces mystères est la nature du Big Bang lui-même : l'origine de l'Univers à partir d'un état de densité infinie.

■ Les auteurs ont conçu un modèle qui expliquerait comment le Big Bang a pu se produire.

■ Ce modèle fait apparaître l'Univers comme la conséquence de l'effondrement d'un astre dans un univers à quatre dimensions d'espace.

© Getty Images/Mark Garlick (artists' conception)

Dans l'allégorie de la caverne, Platon imagine la perception du monde de prisonniers qui ont passé toute leur vie enchaînés face à un mur au fond d'une sombre caverne. Derrière eux, une flamme projette l'ombre de différents objets sur le mur. Ces ombres bidimensionnelles sont les seules choses que les prisonniers ont jamais vues – elles sont leur seule réalité. Leurs chaînes les ont empêchés de voir le monde réel, qui a une dimension de plus que le monde qu'ils connaissent, une dimension riche de complexité dont la connaissance leur permettrait de comprendre ce qu'ils voient. Et si l'allégorie de Platon s'appliquait à la cosmologie ?

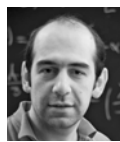
Il se peut que nous vivions dans une gigantesque caverne cosmique, créée aux tout premiers instants de l'Univers. Dans le scénario classique, l'Univers émerge d'un Big Bang issu d'un état infiniment dense. Ce scénario explique de nombreuses observations et offre une vision cohérente du monde que nous voyons, mais il n'est pas exempt de difficultés. Il est crucial de comprendre les limites de ce modèle et de chercher à les résoudre tout en préservant ses succès.

Nous nous sommes intéressés à la question du commencement du Big Bang, qui recèle une partie de ces difficultés, et nous avons élaboré un scénario alternatif. Dans ce dernier, l'Univers remonterait à une époque antérieure au Big Bang, où il existait une dimension spatiale supplémentaire. Ce proto-univers pourrait avoir laissé des traces visibles que de prochaines observations astronomiques permettraient peut-être de découvrir.

L'Univers nous paraît occuper trois dimensions d'espace et une de temps, une géométrie que nous qualifierons d'« univers tridimensionnel ». Dans notre scénario, cet univers tridimensionnel ne serait que l'ombre d'un monde à quatre dimensions spatiales. Plus précisément, l'Univers serait né par l'effondrement d'une étoile en fin de vie quelque part dans ce proto-univers. L'implosion aurait créé un trou noir quadridimensionnel, dont l'enveloppe tridimensionnelle serait notre Univers.

Ce modèle semble particulièrement tiré par les cheveux. Pourtant, il ne s'agit pas uniquement de spéculations gratuites. Ce scénario est solidement ancré dans les mathématiques qui décrivent l'espace et le temps.

LES AUTEURS



Niayesh AFSHORDI est chercheur en cosmologie et astrophysique à l'Université

de Waterloo et à l'Institut Périclète de physique théorique, dans l'Ontario au Canada.



Robert MANN est professeur de physique et d'astronomie à l'Université de Waterloo

et affilié à l'Institut Périclète.



Razieh POURHASAN a étudié à l'Université de Shiraz, en Iran, et est doctorante

à l'Université de Waterloo et à l'Institut Périclète.



Du cataclysme au trou noir

Quand une étoile massive en fin de vie explose, elle engendre un trou noir et forme un nuage de gaz et de poussière, un « vestige de supernova » (en rouge à gauche). Dans un univers de dimensionnalité supérieure, un tel processus pourrait avoir donné naissance à notre Univers et son espace tridimensionnel.

Ces dernières décennies, les physiciens ont développé une théorie, dite du principe holographique, qui présente une analogie avec l'holographie classique – qui permet d'enregistrer les informations d'un volume sur une surface à deux dimensions. Le principe holographique a conduit à l'élaboration de techniques mathématiques qui permettent aux physiciens de traduire une situation complexe en une autre dont la description est plus simple. Ce genre de transformation mathématique s'accompagne d'un changement du nombre de dimensions d'espace entre les deux descriptions. Par exemple, les chercheurs peuvent résoudre des équations de la dynamique des fluides en deux dimensions, et utiliser ces solutions pour comprendre ce qui se passe dans un système beaucoup plus complexe, tel qu'un trou noir tridimensionnel. Mathématiquement, les deux descriptions sont interchangeables ; le fluide est un analogue parfait du trou noir.

L'holographie, pour décrire les trous noirs

Les succès du principe holographique ont convaincu de nombreux physiciens qu'il ne s'agit pas d'une simple transformation mathématique. Peut-être les règles du cosmos sont-elles écrites dans un autre jeu de dimensions et traduites dans les trois que nous percevons. Peut-être, comme les prisonniers de Platon, croyons-nous à tort que l'espace est tridimensionnel alors qu'en réalité, il existe une quatrième dimension dont la prise en compte permettrait de mieux comprendre l'Univers.

La seconde raison pour laquelle cet univers quadridimensionnel présente de l'intérêt est que son étude détaillée pourrait nous aider à répondre à des questions cruciales sur l'origine et la nature du cosmos. Prenons par exemple le Big Bang. Il aurait été immédiatement suivi par l'« inflation », une période d'expansion rapide de l'espace au cours de laquelle le volume de l'Univers primordial a été multiplié d'un facteur 10^{78} , voire beaucoup plus. Mais cette expansion n'apporte aucune information sur l'origine du Big Bang et pose elle-même des questions. En revanche, notre univers quadridimensionnel nous dit comment le Big Bang a commencé et nous dispense de la période inflationnaire.

Les cosmologistes décrivent l'histoire de l'Univers – en partant d'aujourd'hui et en

remontant jusqu'à une fraction de seconde après le Big Bang – à partir de quelques équations (dont celles de la relativité générale) et cinq paramètres indépendants. Ces paramètres incluent les densités de la matière ordinaire, de la matière noire et de l'énergie sombre (dont nous parlerons plus en détail plus loin), ainsi que l'amplitude et la forme des fluctuations quantiques dans l'Univers primordial. Ce modèle cosmologique décrit avec succès de nombreuses observations qui correspondent à des milliers de points de mesure, couvrant des échelles allant d'un million à dix milliards d'années-lumière, jusqu'à la limite de l'Univers observable.

Cependant, ces succès observationnels ne signifient pas que notre tâche est terminée. L'histoire de l'Univers est criblée de trous gênants. Nous sommes confrontés à des questions fondamentales sur la nature du cosmos, des problèmes auxquels jusqu'à maintenant nous n'avons pas été capables de répondre.

Par exemple, si l'on considère le contenu de l'Univers, les observations cosmologiques ont montré que la matière ordinaire ne représente que l'équivalent de 5 % de la densité totale d'énergie de l'Univers. La matière noire, une forme inconnue de matière dont on déduit l'existence à partir de ses effets gravitationnels, représente 25 %. Et les 70 % restants de l'Univers sont constitués d'énergie sombre, de nature non identifiée et qui serait à l'origine de l'accélération de l'expansion de l'Univers (alors que l'attraction gravitationnelle nous faisait initialement penser que l'expansion de l'Univers devait ralentir).

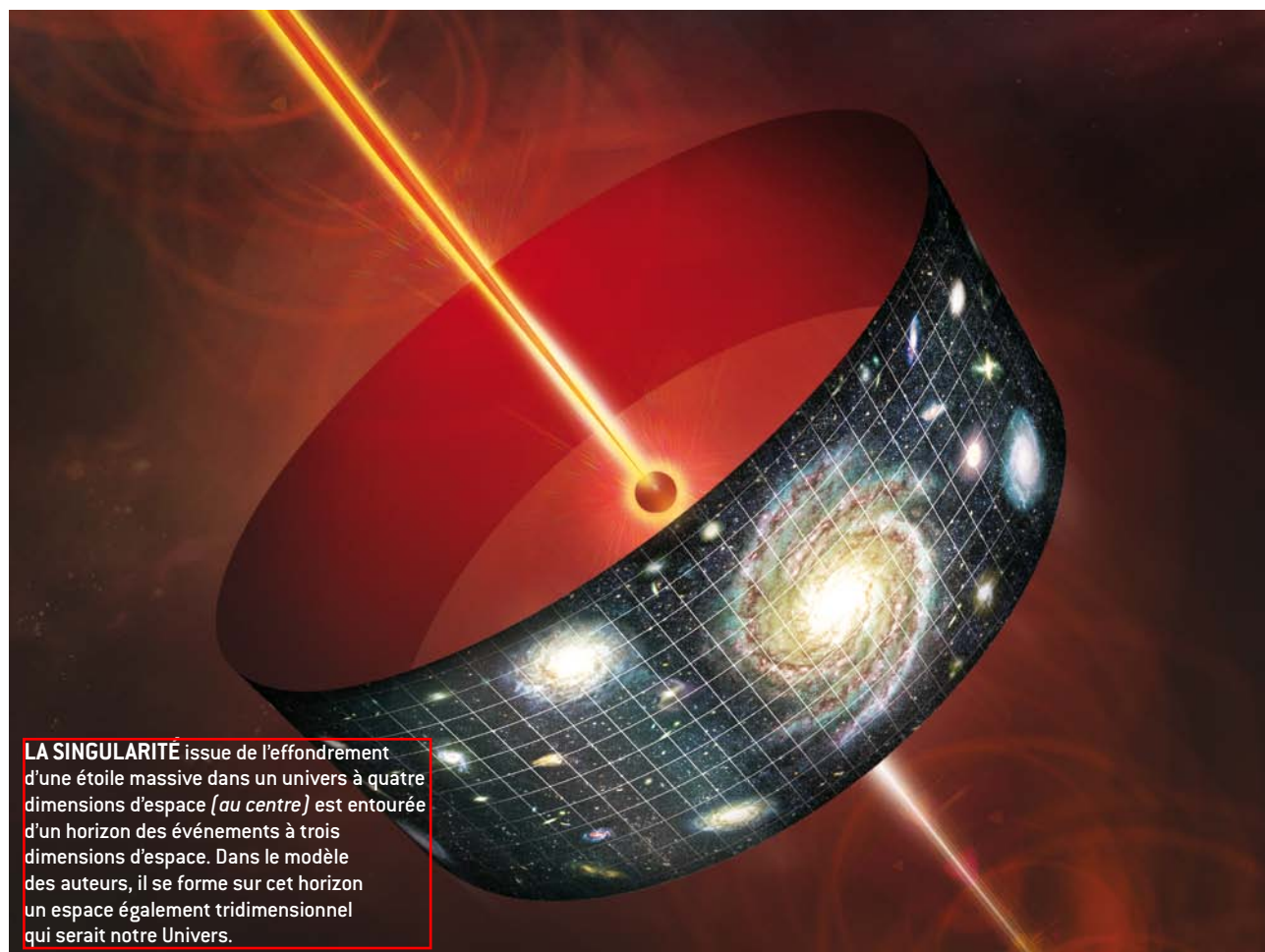
Le Big Bang : beaucoup de questions

Que sont exactement la matière noire et l'énergie sombre, et pourquoi représentent-elles respectivement 25 % et 70 % de l'Univers ? Il existe diverses hypothèses quant à leur nature, mais cela n'explique pas pourquoi leurs caractéristiques doivent être

si finement ajustées pour être en accord avec les observations.

Le contenu de l'Univers n'est pas la seule source de questions. Depuis des décennies, les cosmologistes étudient le rayonnement du fond diffus cosmologique, rayonnement émis alors que l'Univers était âgé de 370 000 ans et qui garde l'empreinte des fluctuations de densité de l'Univers primordial. Les observations récentes du fond diffus par le satellite *Planck* de l'Agence spatiale européenne montrent que la température correspondant à ce rayonnement est uniforme dans tout le ciel ; les variations sont de faible amplitude, de l'ordre d'une partie pour 60 000. En considérant les distances qui séparent les différentes régions et la vitesse d'expansion de l'Univers, certaines de ces régions n'ont été à aucun moment en contact ; comment alors expliquer cette uniformité ?

L'étude du fond diffus cosmologique montre aussi que l'Univers a une courbure spatiale plate à grande échelle (géométrie



LA SINGULARITÉ issue de l'effondrement d'une étoile massive dans un univers à quatre dimensions d'espace [au centre] est entourée d'un horizon des événements à trois dimensions d'espace. Dans le modèle des auteurs, il se forme sur cet horizon un espace également tridimensionnel qui serait notre Univers.

Karin Broome / WOODFIN CAMPBELL

où la somme des angles d'un triangle vaut 180 degrés). Pourquoi l'Univers est-il dans cette configuration si particulière? Pourquoi sa géométrie ne serait-elle pas sphérique ou hyperbolique (configurations où la somme des angles d'un triangle est, respectivement, supérieure ou inférieure à 180 degrés)?

Inflation énigmatique

Peut-être pourrions-nous espérer des réponses si nous comprenions mieux le Big Bang. Il est très difficile en particulier d'imaginer comment l'Univers des premiers instants après le Big Bang a pu donner lieu à celui que nous observons aujourd'hui – un cosmos à la température presque uniforme et dont l'espace est euclidien, c'est-à-dire de courbure nulle.

L'inflation cosmique, cette phase d'expansion rapide dans les premiers instants de l'Univers, est une approche efficace pour expliquer la structure à grande échelle de l'Univers. L'inflation aurait tendance à «aplatir» l'Univers, lissant toutes les régions incurvées de l'espace-temps; en raison de cette expansion rapide, certaines régions de l'Univers, qui semblaient trop éloignées pour avoir été en contact, ont pu l'être, ce qui explique l'homogénéité de température du fond diffus cosmologique. Et, telle une loupe cosmique, l'inflation a amplifié les minuscules fluctuations quantiques de densité jusqu'à des tailles cosmiques. Ces fluctuations sont devenues les germes à partir desquels des structures telles que les galaxies et les étoiles ont émergé.

On considère généralement l'inflation comme un paradigme très fructueux. Mais

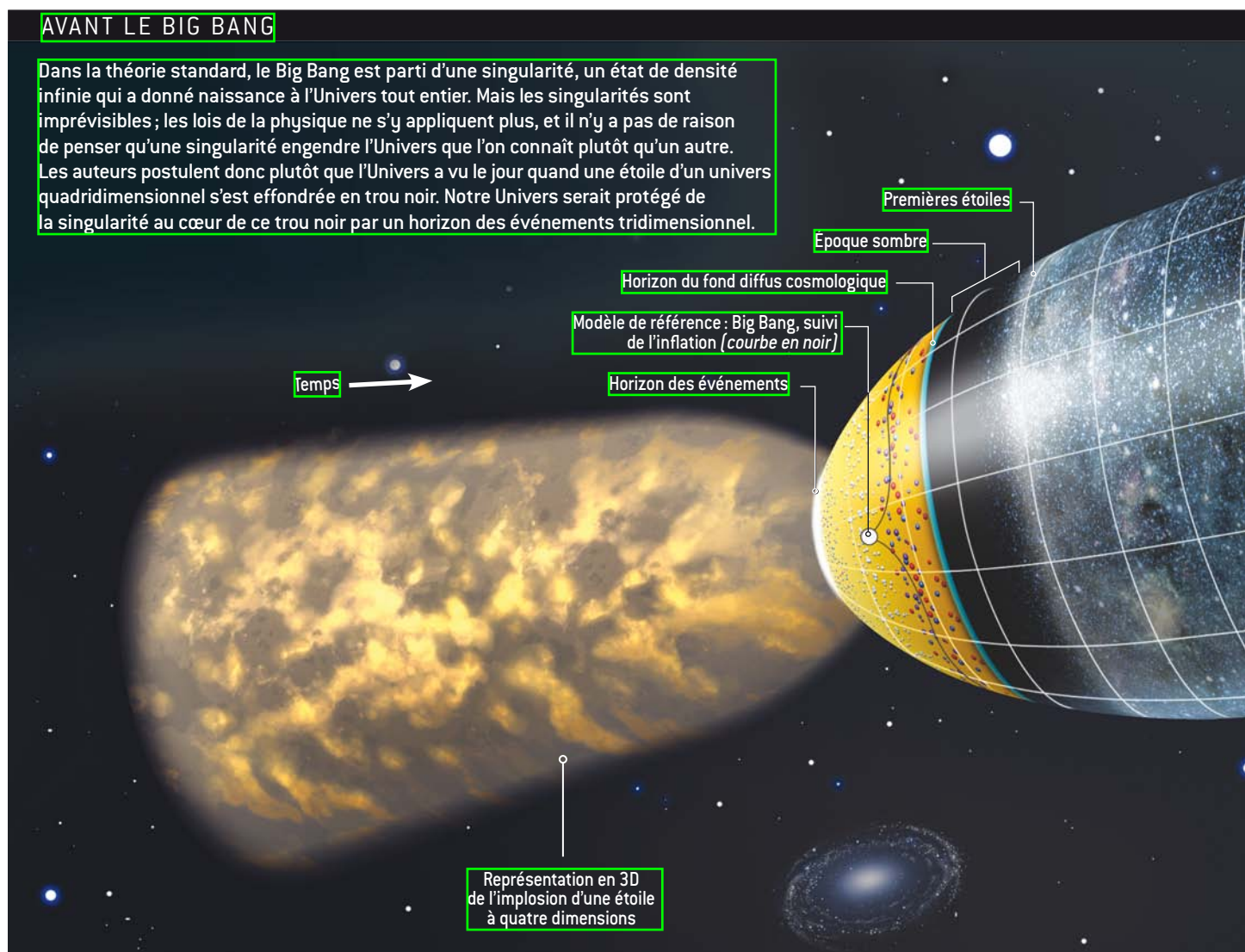
comment l'inflation s'est-elle déclenchée? Beaucoup d'énergie était nécessaire. Selon le modèle standard, l'Univers primordial aurait pu contenir cette énergie sous la forme d'inflatons, des particules hypothétiques. Mais l'inflaton ne résout pas pour autant nos problèmes; il les repousse juste d'un cran.

Il nous manque aussi une description satisfaisante de l'histoire de notre cosmos avant l'époque inflationnaire, ces premiers 10^{-36} seconde après le Big Bang. Ici, les phénomènes quantiques deviennent si importants que les équations de la relativité générale ne sont plus appropriées. Une théorie quantique de la gravitation est requise, et elle manque encore.

Le plus grand défi de la cosmologie est de comprendre le Big Bang lui-même, l'émergence subite et violente de l'espace, du temps et de toute la matière à partir

AVANT LE BIG BANG

Dans la théorie standard, le Big Bang est parti d'une singularité, un état de densité infinie qui a donné naissance à l'Univers tout entier. Mais les singularités sont imprévisibles; les lois de la physique ne s'y appliquent plus, et il n'y a pas de raison de penser qu'une singularité engendre l'Univers que l'on connaît plutôt qu'un autre. Les auteurs postulent donc plutôt que l'Univers a vu le jour quand une étoile d'un univers quadridimensionnel s'est effondrée en trou noir. Notre Univers serait protégé de la singularité au cœur de ce trou noir par un horizon des événements tridimensionnel.



d'un état infiniment dense que l'on nomme une singularité. En présence d'une singularité, toutes les lois de la physique deviennent caduques. Nous n'avons pas les outils pour décrire ce qui s'y passe et nous n'avons aucune raison de penser qu'une singularité engendrerait un univers ordonné comme celui que nous voyons. On s'attendrait plutôt à l'émergence d'un univers extrêmement chaotique, dont le fond diffus cosmologique serait marqué par d'énormes fluctuations de température d'un point à un autre. L'inflation serait-elle suffisante pour lisser les fluctuations? De surcroît, si ces fluctuations sont trop grandes, l'inflation pourrait-elle s'amorcer? Les problèmes d'une singularité ne peuvent pas être résolus par la seule inflation.

Les singularités sont étranges, mais elles ne nous sont pas tout à fait inconnues.

Au niveau d'une singularité, les lois de la physique sont caduques. Nous n'avons pas les outils mathématiques pour décrire ce qui s'y passe.

nues. En effet, il s'en forme également au centre des trous noirs, ces vestiges d'étoiles géantes effondrées. Toutes les étoiles sont des fournaies nucléaires où fusionnent les éléments légers (principalement de l'hydrogène). Ce processus de fusion nucléaire alimente une étoile pendant la majeure partie de son existence et s'oppose à l'effondrement gravitationnel. Cependant, vers la fin de sa vie, l'astre a épuisé tout son combustible nucléaire et la gravité prend le dessus. Une étoile au moins dix fois plus massive que le Soleil s'effondre sur elle-même avant d'exploser en supernova. Si l'étoile est encore plus grosse (plus de 15 masses solaires), la supernova laisse derrière elle un cœur dense qui connaît un effondrement que rien n'arrête, se contractant jusqu'à un point de taille nulle: une singularité qui forme un trou noir.

La singularité du trou noir est cachée par une surface bidimensionnelle que l'on nomme l'horizon des événements. Ce dernier marque une limite de non-retour: toute matière qui franchit cette frontière ne peut plus s'échapper du trou noir, car il lui faudrait une vitesse supérieure à celle de la lumière. La matière est alors inexorablement attirée vers la singularité. L'intérieur de l'horizon des événements est coupé du reste de l'Univers.

Un horizon pour le Big Bang

Comme avec la singularité du Big Bang, les lois de la physique ne s'appliquent plus à la singularité du trou noir. Mais contrairement au Big Bang, un trou noir est entouré d'un horizon des événements. Cette surface se comporte comme une protection: elle empêche toute information concernant la singularité de fuir. L'horizon des événements du trou noir protège les observateurs extérieurs des effets catastrophiquement imprévisibles de la singularité (on parle de censure cosmique).

Enveloppée par un horizon des événements, la singularité ne perturbe pas les lois de la physique qui décrivent et prédisent tout ce que nous observons. Vu de loin, un trou noir est une structure très simple, lisse et uniforme, définie par sa masse, son moment cinétique et sa charge électrique. Les physiciens disent de façon imagée que «le trou noir n'a pas de cheveux»: il n'a aucun signe distinctif en dehors des trois grandeurs citées.



Notre Univers tridimensionnel correspond ici à l'enveloppe bidimensionnelle de la figure.

BRUNO HENRI

En revanche, la singularité du Big Bang (telle qu'on la comprend) n'est pas masquée par un horizon des événements. C'est ce constat qui nous a mis sur la piste de notre modèle. Nous avons cherché un moyen de nous abriter de la singularité du Big Bang et de son imprévisibilité catastrophique, peut-être avec quelque chose qui s'apparente à un horizon des événements.

Effondrement extradimensionnel

Dans notre scénario, l'enveloppe qui entoure la singularité du Big Bang se distingue d'un horizon des événements par une caractéristique essentielle. Puisque nous percevons que notre Univers a trois dimensions spatiales et que celui-ci émerge du Big Bang, l'enveloppe de la singularité au cœur du Big Bang doit également avoir trois dimensions spatiales, et non deux comme l'horizon des événements d'un trou noir. Mais pour que l'horizon des événements soit tridimensionnel, l'objet qui s'effondre en trou noir doit avoir une dimension d'espace de plus, c'est-à-dire qu'il doit avoir quatre dimensions. Ce scénario implique donc que l'objet en question existe dans un univers doté de quatre dimensions d'espace.

L'idée de modèles à dimensions supplémentaires, où le nombre de dimensions d'espace excède les trois qui nous sont évidentes, est presque aussi ancienne que la relativité générale elle-même. Elle a été initialement proposée par le physicien allemand Theodor Kaluza en 1919, et étendue par le Suédois Oskar Klein dans les années 1920. Leur idée initiale était d'unifier dans un même formalisme l'électromagnétisme et la relativité générale. Cette piste a finalement été abandonnée et l'idée de dimensions supplémentaires n'a retrouvé un réel élan que dans les années 1980, avec le développement de la théorie des cordes. Plus récemment, les scientifiques l'ont utilisée pour construire une cosmologie des univers dits branaires.

L'idée essentielle d'un univers branaire est que notre Univers tridimensionnel est un sous-univers qui s'inscrit dans un univers plus vaste, ayant quatre dimensions spatiales ou plus. L'Univers tridimensionnel est ce qu'on nomme une brane, et l'univers de dimensionnalité supérieure est l'espace complet, ou *bulk* en anglais. Toutes les formes connues de matière et d'énergie

Les modèles cosmologiques originaux enrichissent la

L'Univers pourrait avoir plus de trois dimensions d'espace.

L'idée n'est pas nouvelle: elle remonte aux années 1920.

Ce n'est que plus récemment que pléthore de modèles

cosmologiques à dimensions supplémentaires ont été imaginés.

Le scénario envisagé par les auteurs de l'article s'inscrit dans cette lignée, tout en présentant son lot d'idées originales. L'un des points forts est sa façon de traiter la singularité primordiale. Comme les lois physiques sont incapables de rendre compte du comportement d'une singularité, il est souhaitable d'éviter que celle-ci influe sur la structure actuelle de l'Univers. Dans la cosmologie standard, cet écueil est contourné par une phase d'inflation, qui n'a besoin que d'une petite portion d'espace

assez régulière pour opérer et qui va grossir considérablement pour donner naissance à la vaste région qui englobe notre Univers observable. Il est en général admis que ces conditions favorables à l'émergence d'une phase d'inflation ne préjugent pas de façon critique de la physique de la singularité, mais on peut tout de même considérer cette singularité comme problématique.

Ici, on suppose que la singularité du Big Bang résulte d'un effondrement gravitationnel dans un espace-temps à cinq

dimensions. Cela ne résout pas notre incapacité à décrire une singularité, mais, au moins, cette singularité-là ne peut influencer sur le devenir de l'Univers.

Qu'en est-il du point de vue

observationnel ? Technique-ment, les fluctuations de densité issues du modèle des auteurs sont invariantes d'échelle, c'est-à-dire que leur amplitude typique ne dépend pas de leur longueur d'onde. Or les données du satellite *Planck* indiquent que les fluctuations présentes dans l'Univers sont presque, mais pas tout à fait, invariantes d'échelle. Si l'écart à l'invariance d'échelle est effectivement faible (les 4 % mentionnés par les auteurs), il

sont emprisonnées dans notre brane à trois dimensions. L'exception est la gravité, qui qui se propage dans l'ensemble du bulk.

Dans notre scénario, le bulk est notre univers à quatre dimensions. Il est rempli d'objets tels que des étoiles, des galaxies quadridimensionnelles, etc. Une de ces étoiles en fin de vie pourrait alors s'effondrer et former un trou noir, suivant le même mécanisme qui est à l'œuvre dans notre Univers à trois dimensions.

À quoi ressemblerait un trou noir quadridimensionnel ? Il serait lui aussi doté

CE MODÈLE N'A PLUS BESOIN de l'inflation, car l'univers à quatre dimensions d'espace qu'il suppose est antérieur au Big Bang.

d'un horizon des événements, une surface de non-retour ne laissant s'échapper aucune matière ou lumière. Mais au lieu d'être une surface bidimensionnelle comme pour les trous noirs ordinaires, cet horizon des événements serait une région tridimensionnelle.

Plus intéressant, en modélisant l'effondrement d'une étoile quadridimensionnelle à l'aide du principe holographique, nous avons remarqué que, dans des circonstances très diverses, la matière éjectée lors de l'effondrement stellaire peut former une

brane à trois dimensions spatiales sur cet horizon des événements tridimensionnel. Et cette brane est en expansion lente. Notre Univers serait cette brane à trois dimensions spatiales, et correspondrait à un hologramme d'un astre quadridimensionnel s'effondrant en trou noir. La singularité du Big Bang cosmique nous est alors cachée, enfermée pour toujours derrière un horizon des événements tridimensionnel.

Notre modèle a un certain nombre d'arguments en sa faveur, à commencer par le fait qu'il élimine la singularité nue qui a donné naissance à l'Univers. Mais qu'en est-il des autres problèmes cosmologiques, tels que la géométrie presque plate et la grande uniformité du cosmos ? Notre scénario n'a plus besoin de l'inflation : l'univers quadridimensionnel étant

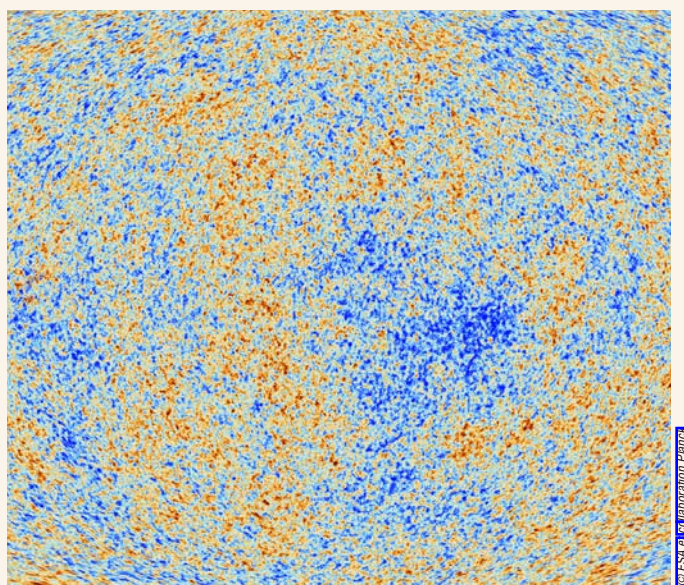
plus ancien que ne l'impose le modèle du Big Bang pour notre Univers, tous les points de l'univers ont pu être en contact et auraient eu le temps d'atteindre l'équilibre (voir l'encadré page 28). Si l'univers complet était homogène, alors notre Univers à trois dimensions spatiales a pu hériter de cette homogénéité. Par ailleurs, plus la masse de l'étoile quadridimensionnelle est importante, plus la brane qu'elle engendre a une géométrie plate, d'où l'on peut conclure que notre Univers est

est réel, ce qui semble irrémédiablement exclure le modèle. Pour s'en sortir, les auteurs invoquent une éventuelle instabilité gravitationnelle dans l'espace-temps à cinq dimensions qui pourrait augmenter l'amplitude des fluctuations de grande longueur d'onde, conformément aux contraintes observationnelles. Mais cet ajout pourrait produire des fluctuations non gaussiennes, c'est-à-dire que trop de fluctuations ont une amplitude qui dépasse la valeur typique qu'elles devraient avoir. Or là aussi, les données de *Planck* ne voient pas la trace d'un caractère non gaussien.

D'une façon générale, l'impact de ces approches théoriques est complexe à évaluer. Celles-ci

traitent certains des problèmes du modèle standard de la cosmologie, mais de nouvelles difficultés émergent par ailleurs. Comment savoir s'il s'agit d'une amélioration ? Deux aspects sont à prendre en compte : les données expérimentales et l'impact auprès de la communauté des chercheurs. Il semble que la piste présentée n'ait pas encore eu d'échos. Mais de tels travaux ne sont pas pour autant stériles. L'imagination des théoriciens permet de défier le modèle standard, de l'enrichir, d'ouvrir des pistes à explorer, quitte à montrer que le scénario standard est, en fin de compte, plus satisfaisant que les idées concurrentes.

- Alain Riazuelo
Institut d'astrophysique de Paris



LE RAYONNEMENT DU FOND DIFFUS COSMOLOGIQUE pose des contraintes importantes sur le modèle standard du Big Bang et les pistes alternatives.

plat parce qu'il émerge de l'effondrement d'une étoile très massive.

Ainsi, notre modèle de Big Bang holographique non seulement résout les principales énigmes de la cosmologie standard (l'uniformité et la géométrie presque plate) sans recourir à l'inflation, mais il supprime aussi les effets délétères de la singularité initiale.

Un scénario que l'on peut tester

La question qui subsiste est : peut-on savoir si ce scénario est correct ? Une des possibilités est d'étudier les détails du rayonnement du fond diffus cosmologique. À l'extérieur de notre brane, l'espace complet contient de la matière, qui serait attirée dans le voisinage du trou noir du fait de l'attraction gravitationnelle. Nous pouvons montrer que ce supplément de matière crée des fluctuations sur la brane qui vont à leur tour déformer le fond diffus dans des proportions faibles, mais mesurables. Nos calculs dans le cadre de ce scénario diffèrent d'environ quatre pour cent par rapport aux dernières données du satellite *Planck*. Mais cette variation peut aussi être la conséquence d'effets secondaires que nous n'avons pas encore correctement modélisés.

De plus, si le trou noir quadridimensionnel est en rotation (beaucoup de trous

BIBLIOGRAPHIE

R. Pourhasan *et al.*, **Out of the white hole : a holographic origin for the Big Bang**, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, vol. 2014, article 04[2014]005, 2014 [en accès libre].

J. Maldacena, La gravité est-elle illusion ?, *Pour la Science* n° 339, janvier 2006.

G. Veneziano, *L'Univers avant le Big Bang*, *Pour la Science*, n° 320, juin 2004.

noirs tournent sur eux-mêmes), alors notre brane pourrait ne pas être identique dans toutes les directions. La structure à grande échelle de notre Univers présenterait de petites différences selon les directions d'observation. Les astronomes pourraient aussi détecter cette anomalie en étudiant les variations subtiles dans le fond diffus cosmologique.

Bien sûr, en même temps qu'il résout la question de l'origine de notre Univers, notre scénario soulève toute une série de nouvelles questions. En premier lieu : d'où est issu l'univers qui a donné naissance au nôtre ?

Pour résoudre cette énigme, nous pouvons nous tourner une fois de plus vers Platon. Quand ses prisonniers émergent de leur caverne, la lumière du Soleil les éblouit et ils ne comprennent pas ce qui les entoure. Ils mettent longtemps à s'habituer à la luminosité. Au début, les prisonniers sont juste capables de distinguer les ombres et les reflets. Mais bientôt ils voient aussi la Lune et les étoiles. Enfin, ils arrivent à voir le Soleil et faire sens du jour, de la nuit et des saisons. Ils comprennent aussi la nature des ombres qu'ils voyaient, mais sans savoir d'où vient la puissance du Soleil, tout comme nous ne comprenons pas l'univers complet quadridimensionnel. Mais au moins ils savent où chercher les réponses. ■

MARTIN GARDNER, le jeu se poursuit

Colm Mulcahy et Dana Richards

Avec la rubrique mensuelle qu'il a tenue pendant près de 25 ans dans le magazine *Scientific American*, Martin Gardner a marqué le monde des mathématiques récréatives et a inspiré de nombreuses personnes.

Comme un bon tour de magie, un casse-tête astucieux peut impressionner, révéler des vérités mathématiques et susciter des questions importantes. C'est en tout cas ce que pensait Martin Gardner. Son nom est indissociable de la rubrique mensuelle *Mathematical Games* qu'il rédigea pendant un quart de siècle dans *Scientific American* (et de 1977 à 1981 dans *Pour la Science*). Gardner, qui aurait eu 100 ans en octobre 2014, présentait chaque mois des sujets mathématiques intéressants sous un angle presque magique et, ce faisant, passionnait un vaste lectorat. Nombreux sont ceux qui ont cité la rubrique de Gardner comme ayant joué un rôle décisif dans leur choix de faire carrière en mathématiques ou dans un domaine connexe.

C'était un homme modeste. Gardner n'a jamais recherché les honneurs ni la célébrité. Mais la centaine d'ouvrages qu'il a laissés (reflétant des connaissances très étendues, qui englobaient sciences et humanités) lui ont valu l'attention et le respect de nombreuses personnalités, tels le paléontologue Stephen Jay Gould ou le linguiste Noam Chomsky.

Bien que Gardner ait arrêté sa rubrique régulière au début des années 1980, son influence est toujours présente aujourd'hui.

L'ESSENTIEL

■ Martin Gardner aurait eu

100 ans en octobre de cette année. Il a tenu durant un quart de siècle une rubrique intitulée *Mathematical Games* (jeux mathématiques) qui a fait sa célébrité.

■ Des centres d'intérêt très

divers, de nombreuses amitiés et une intelligence remarquable lui ont permis de faire découvrir à un vaste lectorat maints sujets importants : chiffrement RSA, jeu de la vie, fractales, pavages de Penrose, etc.

■ Sa rubrique a inspiré

des générations de mathématiciens professionnels et amateurs, dont certains perpétuent l'héritage.

Il a publié des écrits jusqu'à sa mort en 2010, et l'ensemble de ses admirateurs s'étend sur plusieurs générations. Ses lecteurs organisent encore des réunions en son honneur et en celui des jeux mathématiques, et ils produisent aussi de nouveaux résultats. La meilleure façon d'apprécier ses rubriques pionnières est peut-être de les relire, ou de les lire pour la première fois, selon les cas. Peut-être le présent hommage à ses travaux et aux graines qu'ils ont semées incitera-t-il une nouvelle génération à réfléchir aux raisons pour lesquelles les mathématiques récréatives ont encore une importance en 2014.

De la logique aux hexafléxagones

Célèbre dans les milieux mathématiques, Gardner n'était pas pour autant un mathématicien de métier. À l'Université de Chicago, au milieu des années 1930, il se spécialisa en philosophie et excella en logique, mais négligea les mathématiques (il assista cependant à un cours d'« Analyse mathématique élémentaire »). Mais il était bien versé dans le domaine des casse-tête numériques et logiques. Son père, géologue, lui fit découvrir Sam Loyd et Henry



Dudeney, grands innovateurs en matière de casse-tête du début du XX^e siècle.

Dès l'âge de 15 ans, il publia régulièrement des articles dans des journaux de magie, où il explorait souvent des questions relevant à la fois de la magie et de la topologie, ce domaine mathématique où l'on analyse les propriétés qui restent inchangées quand on étire, tord ou déforme des figures sans les déchirer.

En 1948, Gardner s'installa à New York, où il se lia d'amitié avec Jekuthiel Ginsburg, professeur de mathématiques à l'Université Yeshiva et éditeur de *Scripta Mathematica*, revue trimestrielle qui cherchait à mettre les mathématiques à la portée du lecteur moyen. Gardner écrivit pour cette revue une série d'articles sur la magie mathématique, et il semble qu'il fut finalement convaincu par la théorie de Ginsburg qu'« il n'est pas besoin d'être peintre pour apprécier l'art, ni d'être musicien pour apprécier la bonne musique. Nous voulons prouver que l'on n'a pas besoin d'être mathématicien professionnel pour apprécier les figures mathématiques, et même certaines idées abstraites ».

Gardner publia en 1952 son premier article dans *Scientific American*, sur des machines capables de résoudre des problèmes logiques élémentaires. En 1956, il soumit un article sur les hexaflexagones, structures construites à partir de bandes de papier pliées dont les magiciens et les topologistes commençaient à étudier les propriétés. L'article fut immédiatement accepté et, avant même sa parution dans

LES AUTEURS



Colm MULCAHY est professeur de mathématiques au *Spelman College*, à Atlanta en Géorgie (États-Unis).

Dana RICHARDS est professeur d'informatique à l'Université George Mason, à Fairfax près de Washington. Il est auteur d'une biographie de Martin Gardner à paraître.

les kiosques en décembre, on lui demanda de tenir une rubrique mensuelle dans la même veine.

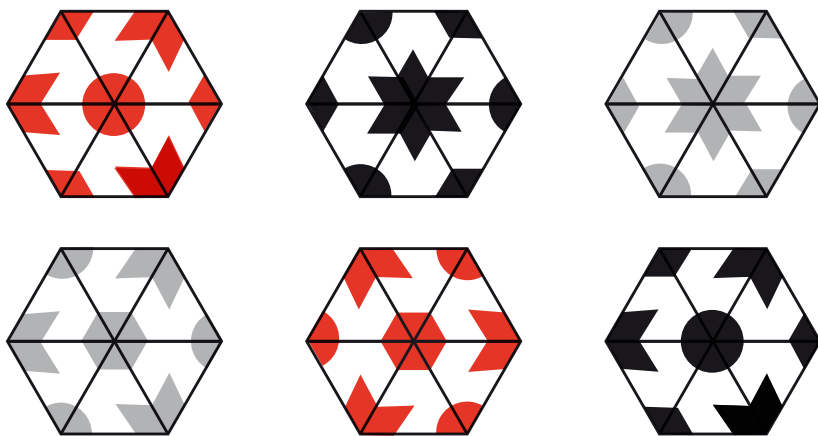
Les premiers articles étaient assez élémentaires, mais les mathématiques présentées se sont approfondies à mesure qu'a augmenté la compréhension de Gardner (et celle de ses lecteurs). D'une certaine manière, Gardner s'est créé une sorte de réseau social à lui, mais à la vitesse de la poste américaine. Il échangeait des informations avec des personnes qui, sinon, auraient travaillé dans leur coin. Depuis ses années d'université, il avait constitué des dossiers très complets et soigneusement organisés. Son réseau l'aida à étoffer ces dossiers et à créer un vaste cercle d'amis impatients d'apporter des idées. Pratiquement tous ceux qui lui écrivaient recevaient une réponse détaillée. Parmi ses correspondants et associés figuraient les mathématiciens John Conway et Persi Diaconis, les artistes M. C. Escher et Salvador Dali, le magicien et sceptique James Randi, l'écrivain Isaac Asimov.

Un esprit universel

Les relations diverses de Gardner reflétaient l'éclectisme de ses propres centres d'intérêt – littérature, prestidigitation, rationalisme, physique, science-fiction, philosophie, théologie... C'était un esprit universel à l'ère des spécialistes. Dans chaque texte, semble-t-il, il trouvait un lien entre son sujet principal et les humanités. Ces références ont aidé de nombreux lecteurs à s'intéresser à des idées qui, sinon, ne les auraient pas accrochés. Par exemple, dans son essai sur « Rien », Gardner alla bien au-delà des concepts mathématiques de zéro et d'ensemble vide (un ensemble dépourvu d'élément) et explora l'idée du rien dans l'histoire, la littérature et la philosophie.

Pour d'autres lecteurs, la rubrique de Gardner était incontournable en raison de son talent de conteur. Il préparait rarement un article sur la base d'un seul résultat ; il attendait plutôt d'avoir assez de matière pour tisser une riche trame d'idées apparentées et de pistes de recherche futures. Il n'était pas rare qu'il passât une vingtaine de jours à faire ses recherches et à rédiger ; il lui semblait que s'il avait du mal à apprendre quelque chose, il était mieux placé qu'un expert pour l'expliquer au grand public.

Gardner traduisait si bien les mathématiques que ses rubriques incitaient



1. SIX DESSINS DIFFÉRENTS PEUVENT ÊTRE OBTENUS à partir d'une même bande de papier décorée, en la pliant en une structure hexagonale plane appelée hexahexaflexagone, puis en la tordant et en la réaplatissant plusieurs fois, comme le montrait Gardner dans le numéro de décembre 1956 de *Scientific American* (voir aussi www.ScientificAmerican.com/oct2014/gardner).

souvent ses lecteurs à aller plus loin. Par exemple, Marjory Rice, une femme au foyer ayant pour tout bagage un certificat de fin d'études secondaires, utilisa ce qu'elle avait appris dans un article de Gardner pour découvrir plusieurs types nouveaux de pavages pentagonaux réguliers, c'est-à-dire des polygones à cinq côtés qui s'agencent parfaitement, sans laisser de vides. Elle écrivit à Gardner, qui transmit le résultat à la mathématicienne Doris Schattschneider pour le vérifier.

Polyominos, jeu de la vie, pavages de Penrose...

La rubrique de Gardner fut le point de départ d'un grand nombre de résultats nouveaux. En 1993, Gardner lui-même identifia les cinq articles qui avaient suscité le plus de réponses des lecteurs : ceux sur les polyominos de Solomon Golomb, sur le jeu de la vie de J. Conway, sur les pavages non périodiques du plan découverts par Roger Penrose, sur la cryptographie RSA et sur le paradoxe de Newcomb (voir l'encadré page 36).

Si certains de ces sujets ont eu tant de succès, c'est peut-être parce qu'il est facile de jouer avec chez soi, en utilisant des objets familiers tels qu'échiquiers, allumettes, cartes et bouts de papier. C'était certainement le cas quand, en mai 1957, Gardner décrivit le travail de S. Golomb, qui venait d'étudier les polyominos, objets formés en mettant côte à côte plusieurs carrés. Un domino est un polyomino constitué de deux carrés, un triomino en a trois, un tétramino quatre, etc. Ils apparaissent dans toutes sortes de problèmes de logique, pavages et jeux populaires, jusqu'aux jeux vidéo modernes tels que *Tetris*.

Certains polyominos apparaissent également comme motifs dans le jeu de la vie de J. Conway. Ce jeu fait intervenir des « cellules », c'est-à-dire des cases d'un réseau carré marquées « vivante » ou « morte », qui vivent (et peuvent ainsi proliférer) ou meurent en obéissant à certaines règles (par exemple, les cellules vivantes ayant deux ou trois voisines survivent, alors que celles qui en ont zéro, une, ou quatre ou plus, meurent). On lance chaque « partie » du jeu à partir d'une configuration initiale, puis les cellules évoluent en respectant les règles. Le jeu de la vie s'inscrivait dans le domaine naissant des « automates cellulaires » qui simulent des systèmes complexes, souvent de manière très détaillée. L'intuition de

J. Conway était qu'un automate trivial à deux états, conçu à la main, avait le potentiel de modéliser un comportement complexe et sujet à évolution.

Après la parution de l'article de Gardner, en octobre 1970, le jeu de la vie acquit rapidement un grand nombre d'adeptes, qui produisirent bientôt des résultats étonnants. Les mathématiciens savaient depuis longtemps qu'une petite liste d'axiomes peut conduire à des vérités profondes, mais la communauté du jeu de la vie du

début des années 1970 en a fait l'expérience directe. Une bonne quarantaine d'années plus tard, ce jeu continue de donner lieu à des découvertes : un nouveau motif auto-constructeur nommé *Gemini* (qui se réplique et détruit le motif parent, tout en se déplaçant obliquement selon un angle différent de 45 degrés, une première) a été présenté en mai 2010, et le premier réplicateur du jeu de la vie qui se clone (lui-même et ses instructions) a été construit en novembre 2013.

Testez-vous

Les énigmes de mathématiques récréatives s'inscrivent dans diverses catégories. Pour les résoudre, il faut faire appel à des dons variés, comme l'illustrent les exemples ci-dessous, dont certains sont des classiques (pour les réponses, voir <http://bit.ly/pls-446-gardner>).

Certains casse-tête ne demandent pas beaucoup plus qu'un raisonnement élémentaire. Voici un exemple. On a trois interrupteurs marche/arrêt au rez-de-chaussée d'un bâtiment. Un seul d'entre eux commande l'ampoule du troisième étage (et rien d'autre). Les deux autres interrupteurs ne sont connectés à rien. Mettez les interrupteurs dans les états que vous voulez. Puis montez au troisième vérifier l'ampoule. Sans quitter le troisième étage, pouvez-vous déterminer quel est l'interrupteur qui commande cette ampoule ? Vous n'avez droit qu'à une tentative.

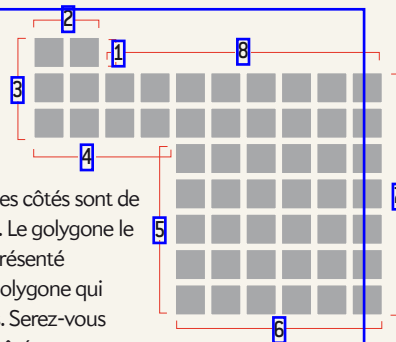
Les cryptarithmes mettent un peu plus à l'épreuve les capacités des amateurs de casse-tête. Dans ces problèmes, chaque lettre correspond à un unique chiffre. Par exemple, pouvez-vous déterminer quel chiffre doit représenter chaque lettre pour que l'addition de droite soit juste ?

CINQ
+ CINQ
+ VINGT

TRENTE

Un don pour la visualisation est utile pour résoudre les « colles » géométriques. Essayez de vous représenter une pyramide ayant une base carrée et quatre faces en forme de triangles équilatéraux, à côté d'un tétraèdre dont les quatre faces sont identiques aux triangles de la pyramide. Maintenant, collez une face triangulaire de la pyramide à un triangle du tétraèdre. Combien de faces le polyèdre résultant possède-t-il ? La réponse n'est pas sept !

Les amateurs de casse-tête, comme les mathématiciens, doivent parfois résoudre des défis qui reflètent des problèmes généraux ou qui nécessitent la construction de preuves logiques. Prenons les polygones de la classe des « golygones ». Tous les côtés adjacents forment un angle de 90 degrés, et les côtés sont de longueur croissante : 1, 2, 3, 4, et ainsi de suite. Le golygone le plus simple, dont les côtés vont de 1 à 8, est présenté ci-contre. C'est à notre connaissance le seul golygone qui pave le plan. Mais il existe d'autres golygones. Serez-vous capables de prouver que le nombre de leurs côtés est toujours un multiple de 8 ? (voir l'article de J.-P. Delahaye, *Pour la Science*, septembre 2014).



Les règles des échecs jouent un rôle dans de nombreux défis, par exemple dans le groupe de problèmes des « reines non attaquées ». Imaginez trois reines blanches et cinq noires sur un échiquier 5 × 5. Saurez-vous les disposer de telle façon qu'aucune reine d'une couleur ne puisse attaquer une reine de l'autre couleur ? Il n'y a qu'une solution (en excluant les symétries et rotations).

J. Conway introduisit aussi Gardner aux pavages découverts par le mathématicien et physicien britannique Roger Penrose, ce qui donna lieu à un autre article très populaire où figurent deux formes de pavés, nommées respectivement cerfs-volants et fléchettes en raison de leur ressemblance avec ces jouets (voir la figure 2). Avec une réserve inépuisable de pavés des deux types, on peut paver un plan infini sans laisser le moindre interstice et avec une propriété remarquable : l'apériodicité. Les pavés de forme ordinaire (carrés, triangles, hexagones) recouvrent un plan en formant des motifs qui se répètent périodiquement. Mais quand on dispose les cerfs-volants et les fléchettes (ou d'autres combinaisons de deux pavés de Penrose ou plus) en respectant certaines règles, paver périodiquement devient impossible.

Ceux qui explorent les propriétés des pavages de Penrose ont, depuis, progressé. Ils ont notamment découvert que les motifs présentent une propriété nommée auto-similarité, qu'ont aussi les fractales, ces structures qui se répètent à différentes échelles (les

BIBLIOGRAPHIE

J.-P. Delahaye, *Flexagones*, Pour la Science n° 333, juillet 2005.

M. Gardner, *Les jeux mathématiques*, Pour la Science n° 252, octobre 1998.

M. Gardner, « Haha » ou l'éclair de la compréhension mathématique, Belin-Pour la Science, 1992.

Le monde mathématique de Martin Gardner, Belin-Pour la Science, 1986.

Site Internet consacré au centenaire de la naissance de Martin Gardner : www.martin-gardner.org

fractales ont elles aussi connu une grande popularité en partie grâce à l'article de Gardner sur le sujet en décembre 1976). Et les pavés de Penrose ont aussi contribué à la découverte des quasi-cristaux, qui ont une structure ordonnée mais apériodique. Gardner en était tout réjoui et commenta : « Ce sont de magnifiques illustrations de la façon dont une découverte mathématique, faite sans la moindre idée de ses applications, peut se révéler présente de longue date chez Dame Nature! »

Cryptage à clef publique

En août 1977, Gardner anticipa un autre développement moderne : l'utilisation du courrier électronique pour les communications personnelles « d'ici quelques décennies ». Cette prédiction ouvrait un article qui présentait la cryptographie RSA, un système de chiffrement à clef publique fondé sur les fonctions à sens unique (des fonctions faciles à calculer, mais pas à inverser). Ces systèmes n'étaient pas une nouveauté au milieu des années 1970, mais

Le paradoxe de Newcomb : qui veut gagner des millions ?

Martin Gardner entend parler d'un problème connu sous le nom de paradoxe de Newcomb dans un article publié en 1969 par le philosophe Robert Nozick, et en fait le sujet de ses rubriques de juillet 1973 et mars 1974. Cette expérience de pensée, créée par le physicien théoricien William Newcomb, s'inspire du mystère de la déterminabilité et du libre arbitre, et elle est toujours activement débattue chez les philosophes.

Un joueur est opposé à un Prédicteur (extra-terrestre superintelligent, voyant ou divinité omnisciente) qui a le don de prédire les actions du joueur. On présente au joueur, ignorant des prédictions, deux boîtes : l'une (A) qui contient toujours 1000 euros, et l'autre (B) qui peut contenir 1000 000 euros. Il a le choix entre prendre juste la boîte B, ou les deux. Avant que le jeu ne commence, le Prédicteur anticipe ce que va faire le joueur. Si le Prédicteur pense que le joueur ne prendra que la

boîte B, alors il y met la récompense d'un million d'euros. Si le Prédicteur pense que le joueur va prendre les deux boîtes, la boîte B ne contiendra rien.

Le paradoxe surgit parce que les deux stratégies pour gagner le plus d'argent semblent toutes deux logiques. La première suppose que prendre les deux boîtes rapporte toujours plus d'argent, indépendamment de la prédiction du Prédicteur. Si ce dernier prédit que le joueur prendra les deux boîtes, alors le joueur qui choisit les deux

boîtes remporte 1000 euros ; en ne sélectionnant que la boîte B, il ne gagne rien (voir le tableau ci-dessous). Si le Prédicteur anticipe que le joueur ne prendra que la boîte B, le joueur qui choisit les deux boîtes reçoit 1001000 euros ; choisir la seule boîte B rapporte un peu moins (1000000 euros).

Mais selon un autre argument, les plus gros gains résulteront toujours du choix de la seule boîte B. Le raisonnement est que le joueur peut ignorer les cas dans lesquels le choix du joueur diffère de la prédiction parce que ces coups supposent que le Prédicteur se trompe, ce qui, par définition, ne peut arriver à cette

divinité. Il y a donc le choix entre prendre les deux boîtes pour 1000 euros, ou seulement la boîte B pour 1000000 euros.

Les lecteurs de Gardner ont produit des quantités énormes de commentaires, détaillant les différents résultats, mais on ne peut toujours pas dire si une stratégie vaut mieux que l'autre. Dans sa présentation initiale du problème, Nozick commentait : « Pour presque tout le monde, ce qu'il convient de faire est parfaitement clair et évident. La difficulté, c'est que ces gens se partagent en deux camps presque égaux, et que beaucoup pensent que l'autre moitié est tout simplement idiote. »

CHOIX PREDIT	CHOIX REEL	GAIN
À la fois A et B	Les deux	1 000 euros
À la fois A et B	Seulement B	0 euros
Seulement B	Les deux	1 001 000 euros
Seulement B	Seulement B	1 000 000 euros

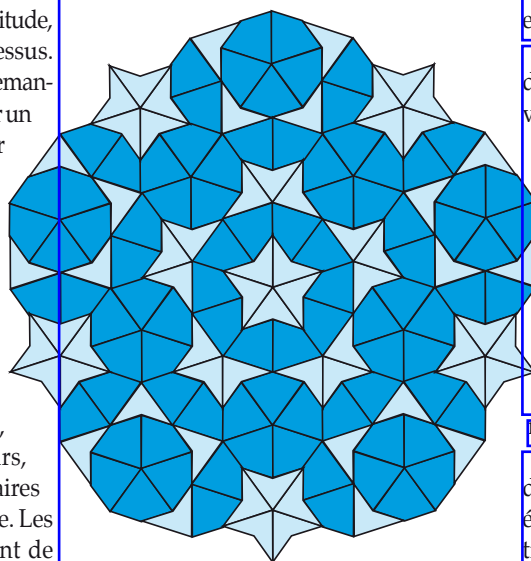
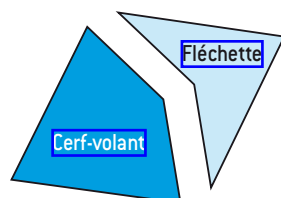
Les informaticiens Ron Rivest, Adi Shamir et Leonard Adleman (qui ont donné leurs initiales au système RSA) ont introduit une fonction à sens unique d'un type différent, fondé sur les grands nombres premiers (entiers divisibles seulement par un et par eux-mêmes). La sécurité du chiffrement RSA découle ainsi de la difficulté à décomposer un entier égal au produit de deux grands nombres premiers, quand ces derniers ne sont pas connus.

Avant de publier leur résultat dans une revue scientifique, R. Rivest, A. Shamir et L. Adleman écrivirent à Gardner, dans l'espoir de toucher rapidement un large public. Gardner comprit la portée de leur innovation et, contrairement à son habitude, se dépêcha de publier un texte là-dessus. Dans son article, il présenta un défi, demandant aux lecteurs d'essayer de décoder un message, ce qui exigeait de factoriser un entier de 129 chiffres, une tâche impossible à l'époque. Gardner préfaça judicieusement ce défi par cette citation d'Edgar Allan Poe: « Il est vraiment douteux que l'ingéniosité humaine puisse créer un code secret dont l'ingéniosité humaine ne vienne à bout. » Et en effet, seulement 17 ans plus tard, une grosse équipe de collaborateurs, s'appuyant sur plus de 600 volontaires et 1 600 ordinateurs, déchiffra le code. Les défis RSA se poursuivirent pendant de nombreuses années, jusqu'en 2007.

Perpétuer l'héritage

La capacité de Gardner à inspirer les autres n'était pas non plus sans lien avec son humour espiègle. Son article du 1^{er} avril 1975 présentait « six découvertes sensationnelles qui ont d'une façon ou d'une autre échappé à l'attention du grand public ». Toutes étaient plausibles... et fausses. Par exemple, il affirma que Léonard de Vinci avait inventé la chasse d'eau. Quelques noms glissés dans le texte étaient censés alerter sur la nature facétieuse de l'article, mais des centaines de lecteurs ne détectèrent pas la plaisanterie et adressèrent à Gardner des lettres au ton vif.

En 1980, Gardner décida d'arrêter sa rubrique, afin de se concentrer sur d'autres projets d'écriture. Plusieurs auteurs lui ont succédé à *Scientific American*: Douglas Hofstadter, A. K. Dewdney, Ian Stewart, Dennis Shasha... « Prendre la suite du tour de force de



2. LES PAVÉS DE PENROSE sont remarquables pour leur production de motifs apériodiques : avec une réserve illimitée de pavés, on peut recouvrir le plan sans aucun vide et de telle sorte que la configuration initiale ne se répète jamais exactement. Gardner publia un article sur les pavages de Penrose de type « cerfs-volants et fléchettes » en janvier 1977. Pour garantir l'apériodicité, les pavés doivent être disposés selon certaines règles.

Martin Gardner était impossible, commenta un jour I. Stewart. Ce que nous avons essayé de faire, c'était de reproduire l'esprit de la rubrique : présenter des idées mathématiques importantes sur un mode ludique. »

Depuis deux décennies, l'esprit de la rubrique se perpétue aux conférences biennales *Gathering 4 Gardner* (participation sur invitation seulement), qui réunissent mathématiciens, magiciens et spécialistes des casse-tête. Gardner lui-même a assisté aux deux premières éditions. Après la mort de Gardner en 2010, des *Celebration of Mind*, auxquelles tout le monde peut assister (et que chacun peut même organiser), ont lieu dans le monde entier tous les mois d'octobre en son honneur.

Même si Gardner nous a quittés, il y a de bonnes raisons de s'inspirer de ses travaux et de promouvoir les mathématiques récréatives aujourd'hui. Retourner en tous sens des casse-tête et autres problèmes débouche souvent sur des découvertes intéressantes. Un grand nombre de ses articles auraient pu être développés et fournir matière à des livres. Gardner n'a jamais envisagé les mathématiques récréatives comme de simples énigmes, mais comme un moyen d'accéder à un riche univers mathématique.

Dans un dernier article, rétrospectif, dans *Scientific American* en 1998, Gardner écrivit : « La frontière entre les mathématiques amusantes et les mathématiques sérieuses est floue [...]. Pendant 40 ans, j'ai fait de mon mieux pour convaincre les enseignants que les mathématiques récréatives devraient être intégrées aux programmes. Elles devraient être régulièrement introduites comme moyen d'intéresser les jeunes élèves à la magie des mathématiques. Mais jusqu'à présent, le mouvement dans cette direction est inexistant. »

Aujourd'hui, Internet regorge d'applications, de tutoriels et de blogs mathématiques, et les réseaux sociaux peuvent mettre en relation les amateurs beaucoup plus vite que Gardner n'en avait les moyens. Mais la vitesse a peut-être un inconvénient : si les expériences ancrées dans le Web sont parfaites pour éveiller l'intérêt, il faut prendre le temps d'une réflexion approfondie pour éprouver de vraies révélations. Le succès de la rubrique de Gardner est en partie dû au fait que lui et son public prenaient le temps d'échanger des idées détaillées et de composer des réponses mûrement réfléchies. ■

Une intelligence d' ÉLÉPHANT

Anna Smet, Catherine Hobaiter et Richard Byrne

Probablement en raison de leur organisation sociale complexe, les éléphants ont développé d'étonnantes capacités de mémorisation, de coopération, de compréhension des autres et de communication.



Certains éléphants d'Asie (*Elephas maximus*) apprivoisés, qui portent une cloche autour du cou, la remplissent de boue pour l'empêcher de tinter quand ils partent piller les champs. Les éléphants d'Afrique (*Loxodonta africana* ou *cyclotis*) creusent parfois des trous pour trouver de l'eau, puis les referment avec de l'écorce pour empêcher son évaporation. La presse et la littérature scientifique abondent d'anecdotes de ce type, qui présentent ces animaux comme particulièrement intelligents. Les dictons populaires, évoquant par exemple une mémoire d'éléphant, viennent renforcer cette image flatteuse.

Ces pachydermes sont-ils à la hauteur de leur réputation ? Les études réalisées au cours des deux dernières décennies tendent à répondre par l'affirmative. Les

éléphants vivent en sociétés complexes, où leurs comportements traduisent de multiples facultés cognitives : capacité à se mettre mentalement à la place de l'autre, mémorisation de l'organisation sociale et des caractéristiques (notamment olfactives) de chaque individu, grande faculté à communiquer... Examinons plus en détail ces capacités et les pressions environnementales qui ont conduit à leur apparition chez les éléphants.

Quand une capacité cognitive se répand dans une espèce, c'est qu'elle répond à une nécessité particulière : par exemple se nourrir, échapper aux prédateurs, se reproduire ou plus généralement remplir certaines fonctions sociales. Les chimpanzés utilisent ainsi des outils pour accéder à des aliments très nutritifs impossibles à atteindre

L'ESSENTIEL

■ Les éléphants trouvent assez aisément de la nourriture et ont peu de prédateurs. Ces deux paramètres n'ont donc influencé que légèrement l'évolution des capacités cognitives chez ces animaux.

■ L'acquisition de ces facultés aurait surtout été dictée par la complexité des interactions sociales.

■ Les éléphants ont acquis des capacités favorisant ces interactions. Ils peuvent par exemple mémoriser l'odeur d'une trentaine de membres de leur famille.

© 2014 L'ESSENTIEL - POUR LA SCIENCE

1. DES ÉLÉPHANTS AIDENT des éléphanteaux à franchir une rivière. Ces animaux s'entraident souvent et savent quel type d'assistance est approprié. Cela suggère qu'ils sont capables de se mettre à la place des autres, c'est-à-dire qu'ils ont une « théorie de l'esprit ».



2. LES HOMMES ET LES LIONS comptent parmi les seuls ennemis des éléphants. Ces derniers ont alors appris à évaluer finement les menaces ; ils reconnaissant par exemple les Massaïs (*ci-contre*), un peuple agressif envers eux, à la couleur rouge de leurs vêtements.

LES AUTEURS

Anna SMET, Catherine HOBATER et Richard BYRNE sont respectivement doctorante, maître de conférences et professeur à l'École de psychologie et de neurosciences de l'Université de St Andrews, en Écosse [Royaume-Uni].

BIBLIOGRAPHIE

K. McComb *et al.*, Elephants can determine ethnicity, gender, and age from acoustic cues in human voices, *PNAS*, vol. 111, pp. 5433-5438, 2014.

A. F. Smet et R. W. Byrne, African elephants can use human pointing cues to find hidden food, *Current Biology*, vol. 23, pp. 2033-2037, 2013.

G. Shannon *et al.*, Effects of social disruption in elephants persist decades after culling, *Frontiers in Zoology*, vol. 10, pp. 1-10, 2013.

autrement : ils collectent des fourmis dans leur nid à l'aide de brindilles. De même, la difficulté à se nourrir a-t-elle entraîné le développement de capacités cognitives particulières chez les éléphants ? Il semble que non. Ces animaux ne sont pas confrontés à des problèmes aussi complexes dans leur quête de nourriture. Ce sont des herbivores généralistes, c'est-à-dire peu sélectifs. Ils disposent de ressources alimentaires variées, incluant l'herbe, les arbustes, ainsi que les feuilles et les branches d'arbre. Leur système digestif est peu efficace (seuls 30 à 45 % de la masse des aliments avalés sont digérés), de sorte qu'ils doivent manger presque constamment quand ils sont éveillés, mais cela ne semble pas nécessiter de capacités cognitives particulières.

Des outils pour se bichonner

Les éléphants utilisent tout de même régulièrement des outils, pas pour se nourrir mais pour prendre soin de leur corps. Ils se servent ainsi de bâtons pour se gratter et de branches (ou de sacs de toile quand ils sont en captivité) pour enlever les parasites, tels que les mouches, de leur peau. Ils modifient peu les matériaux d'origine, se contentant par exemple d'enlever les feuilles d'une branche pour obtenir une tapette à mouches plus efficace.

Les prédateurs ont-ils exercé une pression de sélection plus importante ? Du fait

de sa taille imposante, l'éléphant est un adversaire redoutable pour la plupart des carnivores. Les animaux adultes ne craignent que les hommes, les tigres et les lions. Et encore ces derniers attaquent-ils plutôt les éléphanteaux, qui représentent plus de 20 % de leurs proies dans certaines régions d'Afrique.

Cette pression de sélection semble tout de même avoir été suffisante pour que les éléphants développent des capacités de détection fine des ennemis potentiels. Grâce à des études réalisées dans le Parc National d'Amboseli, au Kenya, on sait que les éléphants classent leurs ennemis selon leur dangerosité et mémorisent leurs caractéristiques olfactives, visuelles et vocales.

En 2007, Lucy Bates, de l'Université de St Andrews, au Royaume-Uni, et ses collègues ont placé trois types de vêtements en tissu sur les chemins de migration de familles d'éléphants. Les vêtements du premier type étaient neufs, tandis que ceux du deuxième et du troisième types avaient été portés par des hommes adultes, appartenant respectivement aux tribus Massaï et Kamba. Les Massaïs sont régulièrement en conflit avec les éléphants, qu'ils attaquent parfois à l'aide de lances pour que leur bétail puisse accéder à l'eau et aux pâturages, tandis que les Kamba ont des rapports plus pacifiques avec eux.

Les éléphants ont réagi plus fortement aux vêtements portés par les Massaïs qu'aux autres : ils se sont éloignés plus vite et plus

loin, et ont mis plus longtemps à se détendre. Ils parviennent ainsi à distinguer une catégorie d'humains qu'ils savent dangereux grâce à leur seul odorat. Ils l'identifient également par certaines caractéristiques visuelles. Ainsi, ils se montrent agressifs envers un chiffon rouge, couleur souvent portée par les Massaïs, mais pas envers un chiffon de couleur neutre.

Dans une étude publiée en mars 2014, Karen McComb, de l'Université du Sussex, au Royaume-Uni, et ses collègues ont montré que les éléphants sont aussi capables de reconnaître un ennemi potentiel à sa voix. Quand ils entendent un enregistrement d'une voix massai, ils se comportent de façon plus défensive qu'à l'écoute d'une voix kamba : ils resserrent le groupe, écoutent attentivement, flairent les alentours avec leur trompe et s'éloignent de la source sonore. Ils dis-

tinguent également la voix d'un homme, qui les fait réagir plus fortement, de celles d'une femme et d'un jeune garçon, même si ces dernières ont subi des traitements acoustiques visant à les rapprocher de voix adultes masculines.

Cette capacité à évaluer finement la menace est aussi observée face aux lions. Les groupes d'éléphants ont ainsi une réaction plus marquée à l'écoute de rugissements préenregistrés quand ceux-ci émanent de trois lions que lorsqu'ils sont émis par un seul animal. Les groupes menés par des femelles âgées et expérimentées distinguent même quand les rugissements sont ceux de lions mâles, plus dangereux pour les éléphants que les lionnes.

La lutte contre la prédation semble donc avoir été l'un des moteurs de l'évolution cognitive des éléphants, mais elle serait loin d'être le plus puissant. C'est

dans leurs interactions sociales que ces animaux rencontrent les situations les plus complexes, en constante évolution et qui requièrent les compétences cognitives les plus élaborées.

Les éléphants vivent dans des sociétés composées de groupes qui se croisent, fusionnent et se séparent en permanence. Chez les primates, l'émergence de sociétés complexes aurait permis une meilleure protection contre la prédation, mais on manque de données pour comprendre cette émergence chez les éléphants. En effet, la plupart de leurs proches parents se sont éteints il y a plusieurs dizaines de millions d'années, de sorte que les comparaisons sont difficiles. Quoi qu'il en soit, la vie dans des sociétés complexes aurait constitué une pression de sélection qui aurait notablement contribué au développement de leurs capacités cognitives.

L'ANCÊTRE COMMUN DES HUMAINS ET DES ÉLÉPHANTS ÉTAIT-IL INTELLIGENT ?

Les études sur les éléphants peuvent nous renseigner sur notre propre évolution cognitive, car ils partagent avec les humains certaines capacités rares dans le monde animal, telle la théorie de l'esprit (la capacité à se représenter les expériences des autres).



Ces capacités sont-elles apparues chez notre ancêtre commun, qui aurait ensuite transmis le matériel génétique sous-jacent aux deux lignées, ou celles-ci les ont-elles développées plus tard, de façon indépendante ?

La lignée des éléphants a divergé de la nôtre il y a plus de 100 millions d'années. Les

éléphants appartiennent à l'ordre des Afrothériens, qui est apparu en Afrique lorsque la tectonique des plaques a séparé le continent des autres. Dans le même ordre taxonomique, on trouve les damans (a), les lamantins (b), les musaraignes-éléphants (c), les taupes dorées, les tenrecs (de petits insectivores

malgaches) et l'oryctérope (un fourmilier surnommé cochon de terre).

Si l'ancêtre commun des hommes et des éléphants avait eu une intelligence exceptionnelle, ce devrait aussi être le cas de tous ses descendants. Or aucune des autres espèces de l'ordre des Afrothériens n'est réputée pour son intelligence.

Les similitudes cognitives de l'homme et de l'éléphant sont donc plus probablement apparues de façon séparée dans les deux lignées, en raison de pressions évolutives voisines. En particulier, la vie dans des sociétés complexes aurait joué un rôle important dans le développement de ces capacités.



3. LES ÉLÉPHANTS MORTS, même à l'état de squelettes, suscitent de fortes réactions chez leurs congénères. C'est un phénomène unique dans le monde animal. Si d'autres espèces, tels les chimpanzés, manifestent un certain intérêt pour leurs congénères morts ou mourants, elles s'en désintéressent quand le corps commence à se décomposer.

Après le binôme mère-petit, l'unité sociale la plus fondamentale est le groupe familial, qui se compose de femelles adultes étroitement apparentées et de leur progéniture (les jeunes mâles quittent ce groupe quand ils sont âgés de 9 à 18 ans, et vivent alors en bandes). L'échelon suivant est le groupe de liaison, qui se compose de plusieurs familles également apparentées, mais moins étroitement que les membres d'un groupe familial. Vient ensuite le clan, qui comprend tous les éléphants partageant leur territoire pendant la saison sèche. Ce territoire est variable et souvent immense, atteignant des milliers de kilomètres carrés dans les savanes africaines. Les groupes d'un clan s'y rencontrent régulièrement, de sorte que chaque individu entre en contact avec un grand nombre d'animaux plus ou moins proches socialement, génétiquement et géographiquement.

Les éléphants manifestent alors des comportements sociaux complexes, qui traduisent des capacités cognitives élaborées. Un exemple est la réaction aux individus morts ou mourants. La plupart des animaux leur témoignent peu d'intérêt, mais les éléphants sauvages y réagissent de façon spectaculaire, parfois même quand ils appartiennent à d'autres espèces. Quand un congénère est malade, mourant ou mort,

Les éléphants ont-ils conscience d'eux-mêmes ?

Le test du miroir consiste à tracer une marque sur le front d'un animal à son insu, puis à le placer devant un miroir. S'il touche son front et non le miroir, cela signifierait qu'il a conscience de lui-même. Des chercheurs ont rapporté que les éléphants réussissent ce test, mais ces résultats sont controversés, notamment parce qu'on peine à les reproduire.

les pachydermes approchent le corps dans un silence inhabituel, le touchent avec la trompe, essaient de le redresser ou de lui mettre de la nourriture dans la bouche, le défendent contre les prédateurs... Une fois assurés qu'il est mort, ils le couvrent de terre et de végétation, comportement qu'ils adoptent également envers des humains décédés.

Les chimpanzés réagissent aussi de façon intense à l'égard d'individus morts (qu'ils peuvent frapper et traîner de façon craintive et agressive, ou, à l'inverse, toucher et toiletter doucement), mais ils s'en désintéressent quand le corps commence à se décomposer. Les éléphants, eux, sont sensibles même aux os ou aux défenses de leurs congénères, comme l'a montré en 2006 l'équipe de K. Mc Comb. Ils reniflent ces restes, les touchent et placent délicatement leur pied dessus, tout en leur témoignant un grand intérêt par rapport à celui qu'ils portent aux squelettes d'autres grands herbivores.

On ignore ce que les éléphants saisissent exactement de la mort, mais leurs réactions suggèrent une certaine compréhension du sens de ces restes. En revanche, l'existence de cimetières d'éléphants n'est qu'un mythe. Ce dernier est sans doute né de la découverte de grandes concentrations de carcasses, qui peuvent s'expliquer par des épisodes de sécheresse ou de chasse intensive.

Autre faculté cognitive élaborée, la « théorie de l'esprit » : il s'agit de la capacité d'imaginer ce que les autres ressentent, pensent, savent ou veulent. Dès l'enfance, nous l'utilisons presque constamment lorsque nous dialoguons avec d'autres personnes. Nous pouvons ainsi prédire et comprendre leur comportement, saisir leur point de vue, coopérer sur un travail complexe, ou les renseigner sur un point que nous savons peu clair pour elles.

La théorie de l'esprit est-elle l'apanage de l'homme ? Le débat est vif, et de plus en plus de spécialistes de la psychologie animale l'attribuent aussi à d'autres espèces, tels les grands singes ou les dauphins. Plusieurs travaux suggèrent que les éléphants en sont également dotés. Dans une étude publiée en 2008, L. Bates et ses collègues ont analysé près de 250 observations recueillies au cours de 35 années d'étude sur des éléphants sauvages. Ces derniers se comportent comme s'ils étaient dotés d'une empathie équivalente à celle

des humains. Ils forment des alliances sociales (des individus s'unissent contre un ou plusieurs congénères agressifs), réconfortent les autres, récupèrent les éléphanteaux séparés du groupe, adoptent les orphelins ; ils aident les autres quand ils sont tombés, embourbés ou coincés dans un trou ; ils retirent les lances (ou les fléchettes tirées par des vétérinaires) plantées sur leurs congénères... Pour savoir qu'un autre éléphant a besoin d'aide – et quel type d'aide est approprié –, ils doivent, dans une certaine mesure, comprendre le point de vue de cet individu.

En outre, une équipe comprenant notamment L. Bates et l'un d'entre nous (R. Byrne), a montré en 2010 que les éléphants se transmettent certaines connaissances. Ainsi, quand une jeune femelle est sur le point d'avoir ses premières chaleurs, les femelles apparentées les plus âgées agissent parfois comme si elles étaient elles-mêmes sexuellement réceptives. Elles tiennent la tête et la queue hautes, marchent d'une façon caractéristique et se montrent tactiles avec les mâles. Elles manifestent ce comportement même en dehors de leurs propres périodes de chaleurs, comme pour montrer à la novice l'attitude à adopter.

Une autre expérience a été réalisée en 2011 par Joshua Plotnik, de l'Université Emory, aux États-Unis, et ses collègues. Ils ont montré que les éléphants d'Asie peuvent coopérer pour atteindre un objectif commun : deux éléphants devaient tirer sur une corde simultanément pour approcher une table poussant devant elle deux bols de nourriture. Si un seul animal tirait, la corde glissait et aucun n'accédait aux aliments.

Là encore, ces comportements suggèrent que les éléphants peuvent adopter le point de vue des autres, c'est-à-dire qu'ils ont une théorie de l'esprit – même si de façon générale, la coopération entre deux animaux n'implique pas nécessairement qu'ils aient une telle capacité.

Des cartes d'identité olfactives

Du fait du grand nombre d'individus auxquels ils sont confrontés dans leur riche organisation sociale, les éléphants ont aussi développé des capacités spéciales pour identifier les autres individus et s'en souvenir. Ils les classent en tant qu'individus et pas seulement par groupes d'appartenance. Dans une étude conduite au parc

national d'Amboseli en 2008, l'équipe de L. Bates a déposé de la terre trempée d'urine sur le chemin d'un groupe d'éléphants en migration (ces animaux se déplacent constamment, afin de trouver des sources d'eau et de nourriture) et ont observé leurs réactions. Les animaux réagissaient plus fortement, flairant le sol plus souvent et plus longtemps, quand l'urine provenait d'un membre de la famille.

Les éléphants ne reconnaissent pas seulement une sorte de « parfum de famille », mais distinguent chaque individu. En effet, les chercheurs ont comparé les réactions des éléphants face à l'urine d'un individu situé à l'avant du groupe en déplacement (et donc susceptible d'avoir déjà uriné à cet endroit) et face à celle d'un individu situé loin derrière. La différence était tout aussi forte : la première femelle qui détectait l'odeur la flairait plus longtemps et plus souvent quand c'était celle d'un congénère situé derrière elle, comme si elle s'étonnait de trouver à cet endroit l'odeur d'un individu qui n'y est pas encore passé.

Ainsi, les éléphants distinguent chaque individu à l'odeur et gardent en mémoire sa position par rapport à eux dans le groupe. Ils seraient capables d'identifier tous les



4. LES ÉLÉPHANTS COMPRENNENT spontanément le geste d'un humain qui pointe un objet du doigt : dans la plupart des cas, ils se dirigent vers le seau pointé par l'expérimentatrice pour chercher de la nourriture. Cela illustre leurs grandes capacités naturelles à communiquer et à comprendre les autres, au moyen de signaux visuels, chimiques et auditifs.

Le plus gros des cerveaux terrestres

La complexité sociale d'une espèce est corrélée à ses capacités cognitives et à la taille du cerveau même si des exceptions existent.

Cette taille est élevée chez les éléphants, qui ont le cerveau le plus massif de tous les animaux terrestres : celui de l'éléphant d'Afrique atteint 6,5 kilogrammes (contre 1,5 kilogramme chez

l'homme). Même rapporté à la taille du corps, le cerveau des éléphants reste gros. Leur quotient d'encéphalisation (qui caractérise le poids du cerveau comparativement à ce qu'on attendrait pour un animal de

cette taille, la valeur 1 signifiant que le cerveau de l'animal a le poids attendu) varie entre 1,3 et 2,3, valeurs comparables à celles des grands singes. En revanche, il n'atteint pas les valeurs extrêmes (autour de 6) mesurées chez les humains et les dauphins.

Le quotient d'encéphalisation

n'indique pas directement le degré d'intelligence, mais il renseigne sur la quantité d'énergie dévolue aux processus cognitifs chez une espèce donnée – l'activité cérébrale étant coûteuse du point de vue métabolique. Ces processus consomment donc une part notable des ressources énergétiques des éléphants.

membres de leur groupe familial, qui comprend jusqu'à 17 femelles adultes et leur progéniture (un maximum d'une trentaine de membres au total), uniquement à partir de leur urine.

Pour créer et maintenir des liens sociaux au sein de leurs vastes réseaux, les éléphants communiquent par des signaux visuels, chimiques et auditifs. Peu d'études se sont penchées sur les signaux visuels, sans doute parce qu'ils sont moins importants que les autres. Cependant, nous avons montré en 2013 que les éléphants en captivité comprennent spontanément le geste d'un humain qui pointe un objet du doigt, un des signaux les plus élémentaires que nous utilisons pour rediriger l'attention des autres : quand l'animal est confronté à deux seaux et que l'expérimentateur pointe l'un d'eux, il se dirige plus souvent vers ce dernier pour y chercher de la nourriture. On ignore si les éléphants pointent des objets de la trompe entre eux, mais le fait qu'ils comprennent qu'un geste humain est un signal visant à communiquer suggère que dans la nature, ils peuvent aussi interpréter de la sorte les mouvements des autres.

D'autres signaux visuels sont d'ailleurs connus. Ainsi, les éléphants secouent la tête pour exprimer l'irritation ou l'impatience, voire pour effrayer un prédateur, un adversaire ou un voisin inopportun, tel qu'une voiture roulant trop près d'eux. Autre exemple : un éléphant qui veut donner

le signal du départ se place au bord du groupe, face à la direction dans laquelle il souhaite aller, et attend là en grondant.

La plupart des recherches sur la communication des éléphants portent sur les signaux vocaux, qui comprennent une large gamme de sons : grondements doux, cris, hurlements assourdissants. Les grondements semblent transmettre de nombreuses informations sociales. Ils expriment par exemple l'état émotionnel et l'identité de leur émetteur, comme l'ont montré en 2005

Des éléphants auraient mémorisé les cris de contact d'une centaine de femelles, appartenant à 14 familles.

Joseph Soltis, du programme de recherche sur les animaux chez Disney, et ses collègues. Dans la nature, les éléphants peuvent également identifier leurs connaissances via leurs vocalisations.

En 2000, K. McComb et ses collègues ont publié une étude sur les cris dits de contact – qui servent à maintenir le contact avec des compagnons hors de vue – des éléphants d'Afrique. Ces cris sont émis dans le domaine des infrasons, c'est-à-dire que leur fréquence est inférieure à 20 hertz et inaudible pour l'homme. Les chercheurs ont diffusé des enregistrements de cris de contact émis tantôt par des éléphants quelconques, tantôt par les femelles de la famille proche et du groupe de liaison.

Dans ce dernier cas, les animaux se sont approchés du haut-parleur et ont lancé leurs propres cris de contact. Les éléphants auraient ainsi mémorisé les cris de contact d'une centaine de femelles, appartenant à 14 familles.

Comme dans la reconnaissance des prédateurs, l'expérience compte : les groupes familiaux dont la matriarche est âgée distinguent mieux, sur la base de leurs cris de contact, les individus qu'ils rencontrent régulièrement de ceux qu'ils n'ont jamais croisés. La survie de l'ensemble du groupe dépend des connaissances sociales de sa matriarche. Ainsi, des rapports de dominance existent entre les groupes et quand des éléphants s'abreuvent à un point d'eau ou se reposent à l'ombre, il est plus prudent pour eux de libérer la place à l'arrivée d'un groupe dominant.

En 2013, Graeme Shannon, de l'Université du Sussex, au Royaume-Uni, et ses collègues ont montré que les éléphants peinent à s'orienter dans leur complexe organisation sociale quand ils ont été déplacés ou séparés de membres de leur famille suite à des opérations d'abattage, même quand celles-ci ont été réalisées des décennies auparavant. De telles opérations, qui constituent une méthode controversée de gestion des populations d'éléphants, ont été menées à grande échelle en Afrique australe, dans les années 1980 et 1990. La mort d'un éléphant peut ainsi influencer sur la survie de tout le groupe, en particulier s'il est âgé et doté d'importantes connaissances sociales.

Les recherches récentes renvoient donc l'image de géants sensibles, très sociaux, chez qui la coopération, la communication et l'entraide sont fondamentales. Sans nier les problèmes complexes posés par le partage du territoire avec les éléphants, nous devons prendre des engagements forts pour la préservation de cette espèce : interdiction du commerce de l'ivoire, campagnes de lutte contre le braconnage, études sur la prévention des conflits entre les hommes et les animaux... Cette conservation est particulièrement difficile, notamment en raison des effets à long terme des campagnes d'abattage sur les membres survivants des familles ou des clans. On doit donc garder à l'esprit que l'unité familiale des éléphants est centrale et que la survie du groupe tout entier dépend de son intégrité. ■



CHAQUE MOIS



CHAQUE TRIMESTRE



+ **L'APPLICATION**
pour smartphone
et tablette, téléchargeable
sur Appstore et Google Play

+ **LES VERSIONS**
NUMÉRIQUES
téléchargeables en PDF
ou à lire en ligne sur le site

+ **18 ANS D'ARCHIVES**
ET DES CONTENUS
INÉDITS sur le site

POUR LA SCIENCE

LA PRESSE SCIENTIFIQUE DE RÉFÉRENCE

WWW.POURLASCIENCE.FR • WWW.CERVEAUETPSYCHO.FR

Cerveau & Psycho



TOUS LES 2 MOIS



CHAQUE TRIMESTRE



+ **L'APPLICATION**
pour smartphone
et tablette, téléchargeable
sur Appstore et Google Play

+ **LES VERSIONS**
NUMÉRIQUES
téléchargeables en PDF
ou à lire en ligne sur le site

+ **10 ANS D'ARCHIVES**
ET DES CONTENUS
INÉDITS sur le site

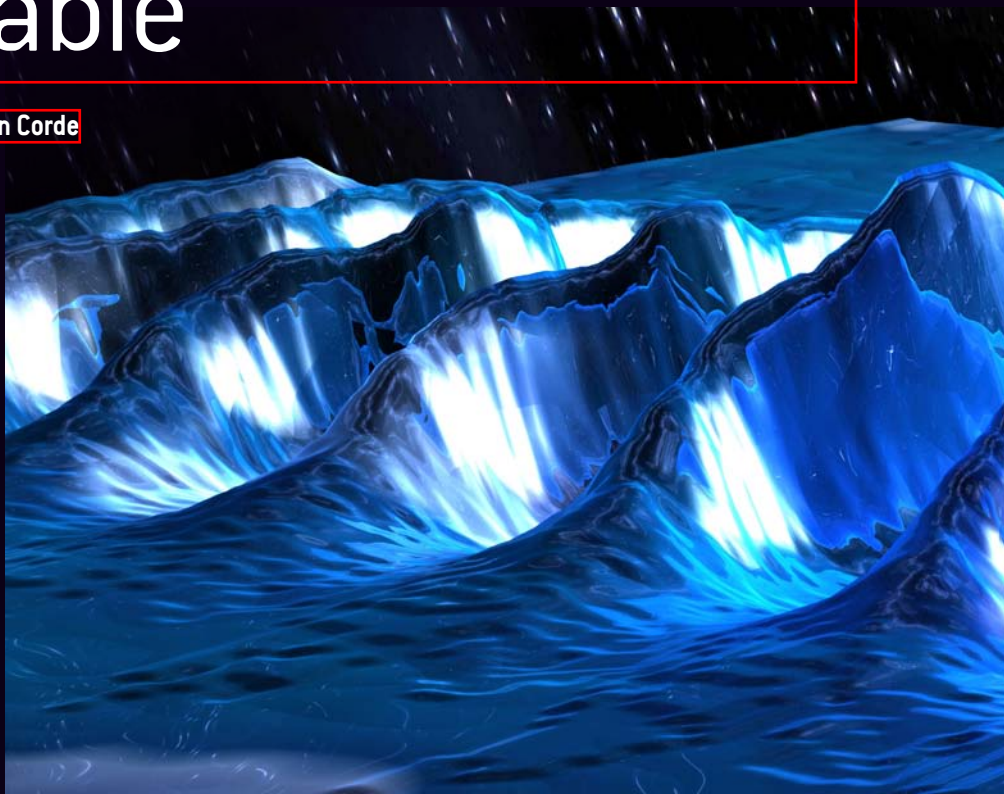
Retrouvez Pour la Science et
Cerveau & Psycho également sur :



Produire des rayons X et γ sur une table

Kim Ta Phuoc, Cédric Thaury et Sébastien Corde

Grâce aux ondes de sillage créées par des impulsions laser ultrabrèves qui traversent un gaz, les chercheurs mettent au point des sources compactes et puissantes de rayons X ou gamma.



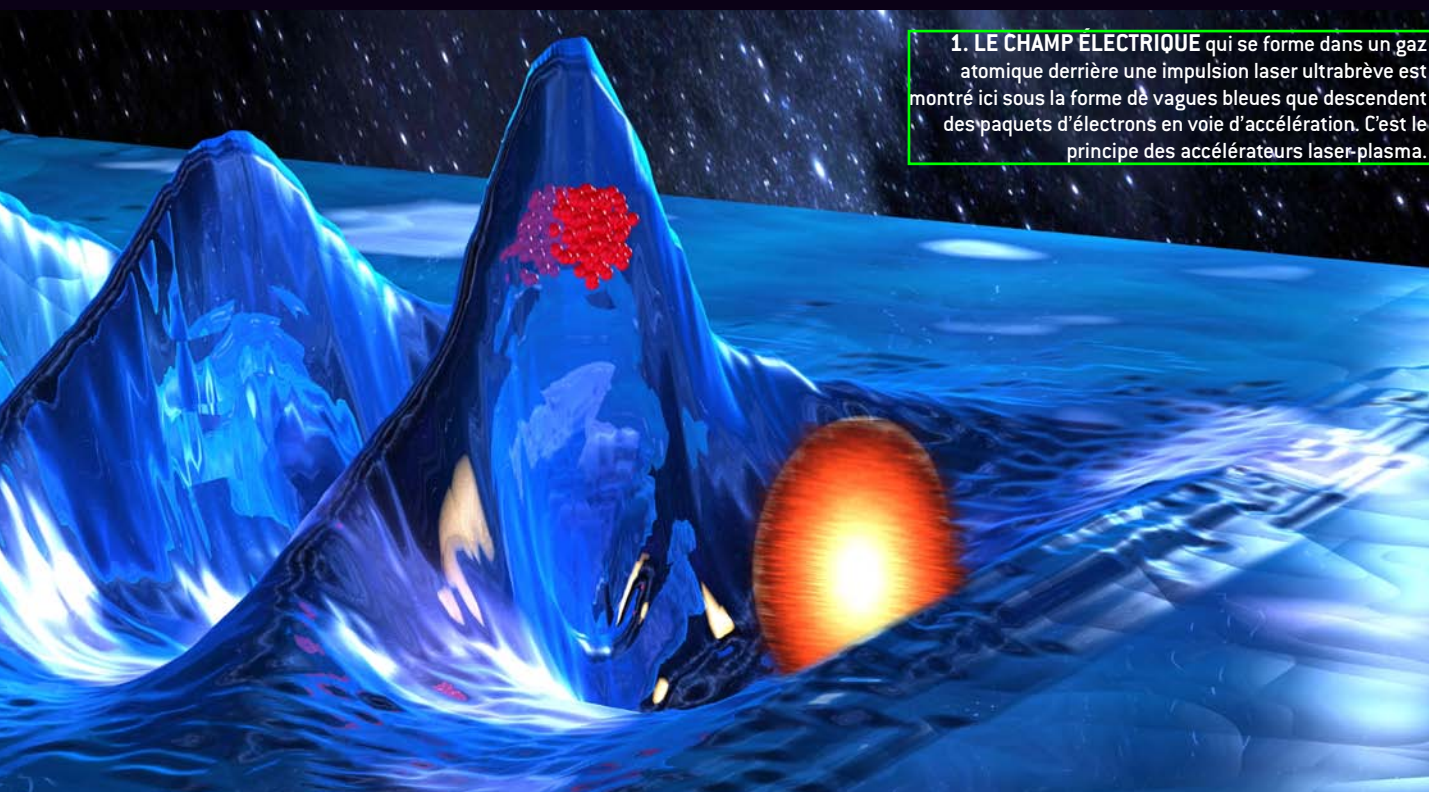
Imaginez un faisceau laser plus puissant que 100 000 réacteurs nucléaires. Seulement, pour le construire, nul besoin de bâtir des champs de centrales, car sa puissance n'est liée qu'à la brièveté de son impulsion ! En effet, une puissance est une énergie dépensée pendant un temps ; à énergie dépensée constante, si la durée du processus diminue, la puissance augmente. C'est ainsi qu'en tirant dans un gaz une impulsion laser ultrabrève d'une puissance instantanée de plusieurs dizaines de milliers de milliards de watts, les physiciens sont parvenus récemment à produire des faisceaux de rayons X et gamma (γ) ultrabrillants. Nommé accélérateur laser-plasma, ce nouveau type de source de rayonnement est encore en cours de développement,

mais il atteint ou dépasse déjà les performances des faisceaux produits au sein de ces accélérateurs circulaires de plusieurs centaines de mètres de circonférence que sont les synchrotrons. Il s'agit en fait d'un véritable synchrotron miniature de seulement quelques millimètres de long. Nous allons voir comment on obtient ces nouvelles sources compactes, intenses et d'un coût raisonnable, et à quoi leurs flashes de rayons X de seulement quelques milliardièmes de milliardième de seconde pourraient servir.

Pour explorer l'intimité de la matière et y agir, on utilise souvent des instruments de lumière. Le rayonnement X en fait partie. Ses longueurs d'onde sont de l'ordre de l'angström (10^{-10} mètre, ou 0,1 nanomètre), soit la distance intra-atomique caractéris-

tique. Des rayonnements électromagnétiques de ces longueurs d'onde peuvent révéler les structures atomiques et moléculaires. On peut par exemple déterminer l'arrangement des atomes dans la matière par diffraction de rayons X. Dans cette technique, un rayonnement X arrivant sur un échantillon est renvoyé dans diverses directions qui dépendent de l'arrangement des atomes dans la matière : on dit qu'il est diffracté. La figure de diffraction permet de déduire la position des atomes. On utilise très souvent la diffraction X pour étudier des matériaux ordonnés tels que les cristaux, mais cette technique fonctionne aussi pour étudier des liquides ou des milieux désordonnés.

Le rayonnement X a aussi un grand pouvoir de pénétration de la matière, mais



1. LE CHAMP ÉLECTRIQUE qui se forme dans un gaz atomique derrière une impulsion laser ultrabrève est montré ici sous la forme de vagues bleues que descendent des paquets d'électrons en voie d'accélération. C'est le principe des accélérateurs laser-plasma.

AGENCE FRANCE PRESSE

dépendant du matériau traversé. Il est faiblement absorbé par les matériaux peu denses et l'est fortement par les matériaux denses. Un rayonnement X de longueur d'onde égale à 0,4 angström traverse par exemple trois millimètres d'aluminium ou 40 centimètres de plastique. Cet effet permet d'obtenir des images dont le contraste dépend de l'absorption. C'est la radiographie classique, utilisée par exemple en médecine diagnostique, mais aussi dans l'industrie pour réaliser des contrôles non destructifs de pièces mécaniques.

Plusieurs types de sources de rayons X existent. Les plus communes, celles que l'on trouve dans les hôpitaux, sont des tubes à rayons X. Dans ces sources, le rayonnement X est obtenu

en bombardant des cibles métalliques avec des électrons accélérés, dont les collisions avec la matière produisent le rayonnement. Ce type de source a l'avantage d'être très compact et bon marché, mais le rayonnement produit n'est pas de bonne qualité. Émis dans toutes les directions, il doit être concentré; il comporte toute une gamme de longueurs d'onde (il est donc peu cohérent) et la dimension importante de la zone d'émission limite la résolution des images radiographiques.

Quand les images doivent être plus précises, on préfère employer le rayonnement X produit par les synchrotrons. Développés dans les années 1940, ces instruments sont très utilisés par les chercheurs. Ils comprennent un

L'ESSENTIEL

■ Dans un gaz atomique, une impulsion lumineuse ultrabrève et puissante crée un sillage de plasma.

■ La séparation spontanée des charges électriques y accélère des électrons, qui émettent alors des rayons X ou γ .

■ Comparables aux synchrotrons, ces nouvelles sources X et γ sont bon marché et devraient avoir la même utilité en recherche fondamentale.

AGENCE FRANCE PRESSE

dispositif capable de produire et d'accélérer des électrons jusqu'à des vitesses proches de la vitesse de la lumière et une structure périodique d'aimants – un « onduleur » – qui fait osciller ces électrons perpendiculairement à leur direction de propagation (voir la figure 2). Les accélérations subies par les électrons à chaque courbure de leur trajectoire ont pour effet de convertir une partie de l'énergie cinétique en rayonnement X. Le faisceau produit a des propriétés simples et intéressantes : il est émis vers l'avant sous la forme d'un cône peu divergent ; son énergie peut être contrôlée directement, en faisant varier soit l'énergie des électrons, soit la période de leurs oscillations. Ainsi, plus les électrons sont énergétiques, plus ils oscillent rapidement et plus le rayonnement émis sera énergétique, donc de courte longueur d'onde.

Pour atteindre la gamme des rayons X dans un synchrotron, on utilise généralement des électrons oscillant avec des périodes spatiales de quelques centimètres et progressant à des vitesses égales à quelque 0,9999999 fois celle de la lumière...

L'énergie d'électrons accélérés jusqu'à de telles vitesses atteint plusieurs gigaélectronvolts, c'est-à-dire un milliard d'électronvolts. Rappelons que l'électronvolt est l'énergie acquise par un électron accé-

VERS LES SYNCHROTRONS DE TABLE

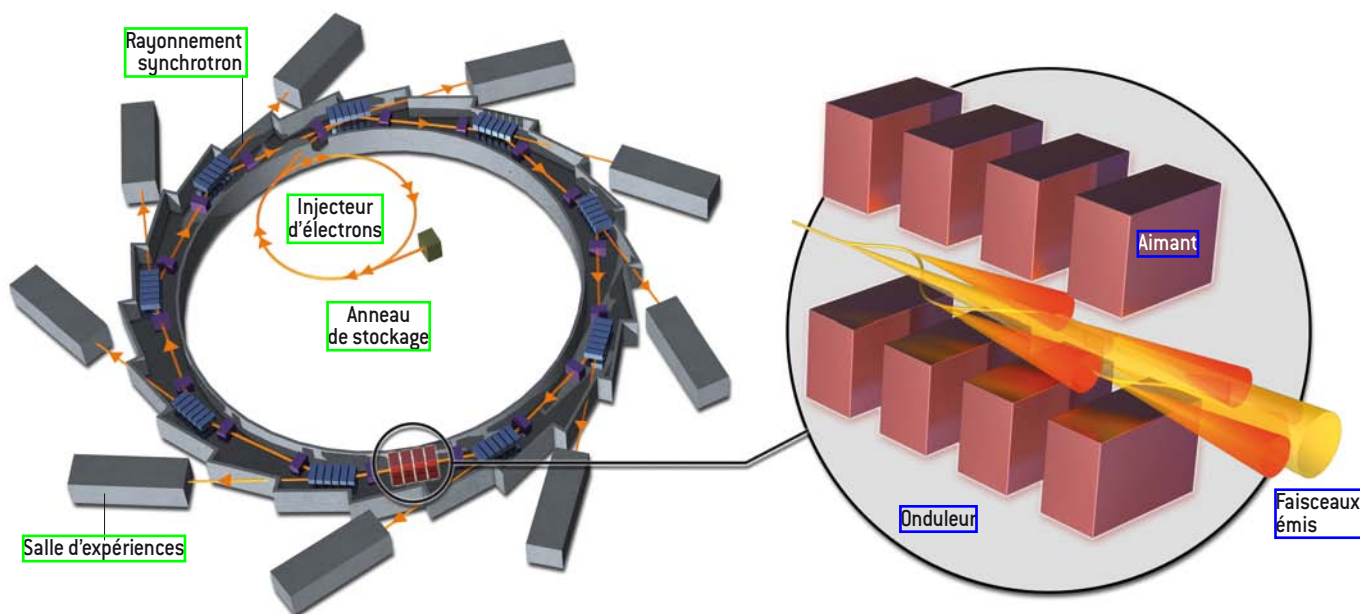
- **1960** Le premier faisceau laser est obtenu d'un laser à rubis.
- **1979** L'accélération dans les plasmas est étudiée théoriquement.
- **1985** Débuts des lasers femtosecondes de puissance.
- **1995** Première démonstration d'un accélérateur laser-plasma.
- **2004** Premier faisceau de rayons X issu d'un accélérateur laser-plasma.
- **2012** Premier faisceau de rayons gamma issu d'un accélérateur laser-plasma.

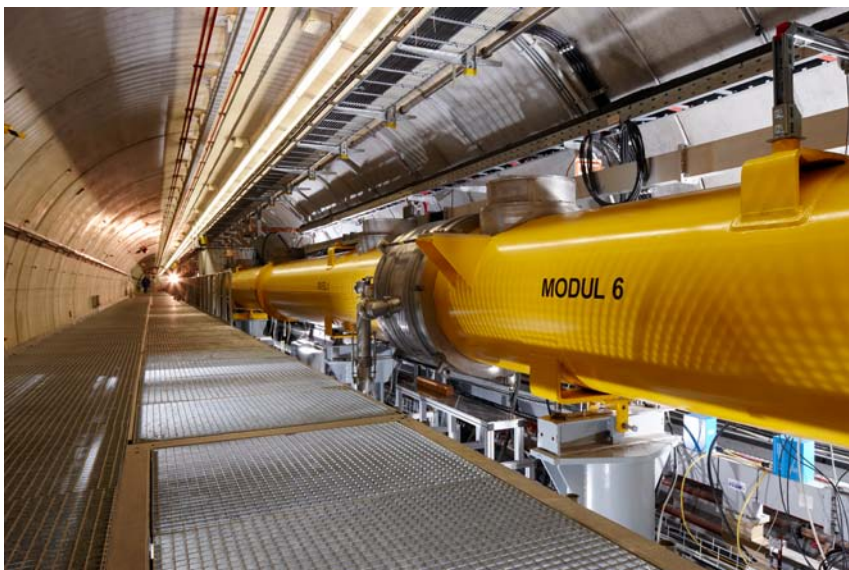
léré à l'aide d'une tension électrique de un volt. En unités d'énergie, la masse de l'électron vaut 0,511 mégaélectronvolt (million d'électronvolts). Ainsi, lorsque l'énergie cinétique d'un électron atteint deux gigaélectronvolts, elle représente quelque 4000 fois l'énergie équivalente à sa masse... À titre de comparaison, à la température ambiante, l'énergie cinétique d'une molécule atmosphérique avoisine 0,04 électronvolt.

Filmer des atomes en mouvement

En France, il existe deux synchrotrons : SOLEIL sur le plateau de Saclay et l'ESRF à Grenoble. Ces grandes installations produisent du rayonnement allant de l'infrarouge (longueur d'onde micrométrique) aux rayons X (longueurs d'onde de l'ordre de l'angström). Ces machines sont très fiables et utilisées quotidiennement par de nombreux scientifiques de disciplines diverses. Elles ont donné lieu à de grandes avancées scientifiques et techniques portant sur la structure de la matière et du vivant. En 2009, le prix Nobel de chimie a par exemple récompensé des travaux où le rayonnement synchrotron avait été utilisé pour étudier la structure et la fonction des ribosomes, ces machines intracellulaires de synthèse des protéines mesurant environ 20 nanomètres et pouvant contenir jusqu'à 300 000 atomes... Pareilles avancées sont particulièrement utiles pour comprendre la façon dont sont faits et fonctionnent les êtres vivants.

2. DANS LES SYNCHROTRONS, des électrons sont injectés dans un anneau après avoir été amenés pratiquement à la vitesse de la lumière. À chaque virage dans un électro-aimant (*en bleu*), les paquets d'électrons émettent un rayonnement synchrotron, ensuite exploité dans les salles d'expériences. En amont de certaines salles sont disposées des alternances d'aimants – les onduleurs – où les électrons zigzaguent en émettant du rayonnement synchrotron. Ce dispositif augmente l'intensité du faisceau (*à droite*).





Aujourd'hui, des applications de ces nouveaux faisceaux intenses de rayons X commencent à émerger. Les chercheurs ne se contentent plus d'images statiques des structures atomiques. Ils veulent désormais filmer les atomes en mouvement et comprendre la dynamique des réactions élémentaires de la matière. Pour cela, il faut être capable d'en capturer l'image pendant un temps très bref, assez bref pour que les atomes n'aient pas le temps de bouger sensiblement. Comme avec un stroboscope (un dispositif émettant une série de flashes lumineux), on peut ensuite employer ces images pour reconstruire un mouvement et sa dynamique. La brièveté nécessaire se déduit de la vitesse des mécanismes que l'on veut observer. Or un mouvement atomique élémentaire ne dure que quelques milliardièmes de milliardième de seconde, soit quelques femtosecondes (une femtoseconde = 10^{-15} seconde). Pour voir des mouvements aussi rapides, il faut donc des flashes de lumière d'une durée comparable.

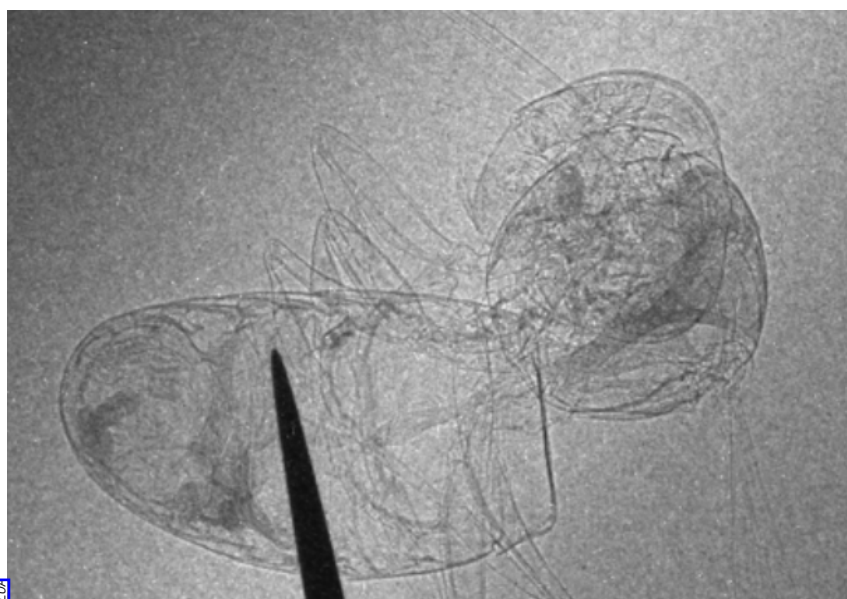
Les lasers émettant des faisceaux lumineux visibles – c'est-à-dire de longueurs d'onde comprises entre 0,4 et 0,8 micromètre – ou proches du domaine visible permettent d'obtenir les flashes ultrabrefs nécessaires. On les utilise pour étudier des réactions chimiques selon la méthode dite «pompe-sonde» : un premier flash ultrabref excite la réaction, puis un second analyse le résultat de l'excitation. Ces travaux ont entraîné des avancées majeures en chimie, en biologie et en pharmacologie. Toutefois, de tels flashes ne permettent pas de suivre les mouvements atomiques, car les lon-

3. LE TUNNEL D'ACCÉLÉRATION DE FLASH, la machine (située à Hambourg) où a été démontré le principe des lasers à électrons libres en 2001. Mis à la disposition des chercheurs depuis 2005, FLASH produit des rayons X de longueur d'onde égale à quatre nanomètres. Le laser XFEL actuellement en construction près de Hambourg atteindra pour sa part des longueurs d'onde de 0,1 nanomètre, suffisamment petites pour explorer les structures intra-atomiques.

gueurs d'onde du rayonnement visible sont environ 1 000 fois supérieures aux déplacements atomiques, de l'ordre du nanomètre. Pour filmer le mouvement des atomes, il faut d'une part des flashes dont la durée se mesure en femtosecondes, et d'autre part un rayonnement dont les longueurs d'onde sont de l'ordre de la taille atomique, donc des rayons X.

Au-delà des synchrotrons

Les synchrotrons classiques ne permettent guère de produire des flashes de rayons X assez brefs. Certes, il existe bien quelques méthodes pour produire des impulsions brèves à partir du rayonnement synchrotron, mais en raison de la longueur des paquets d'électrons, il est difficile d'obtenir des flashes assez brefs pour saisir des réactions ultrarapides. Il a donc fallu développer de nouvelles machines : les lasers à électrons libres (voir la figure 3 et l'article *Le plus puissant faisceau de rayons X*, page 54). Ces installations, dont la première est entrée en fonctionnement en 2005, sont le fruit de dizaines d'années de développement. Extrêmement performantes, elles livrent des impulsions de rayons X des millions de fois plus brillantes que celles de toute source existante. Les lasers à électrons libres sont fondés sur un principe très proche de



4. DES RADIOGRAPHIES DE GRANDE PRÉCISION peuvent être réalisées à l'aide des rayons X produits par les accélérateurs laser-plasma. Ci-dessus, les délicates structures d'une guêpe ont ainsi été radiographiées pour démontrer cette possibilité. Outre la tête et le corps, on reconnaît les ailes et les pattes de l'insecte ainsi que plusieurs structures internes, qu'il devient ainsi possible d'étudier sans avoir à effectuer une difficile dissection.

Comment une impulsion lumineuse dans un gaz d'atomes peut-elle accélérer des électrons ? Une impulsion lumineuse présente un champ magnétique et un champ électrique qui oscillent dans des directions perpendiculaires à la direction de propagation. Ce n'est pas ce champ électrique qui accélère les électrons, mais un champ secondaire qu'il contribue à créer.

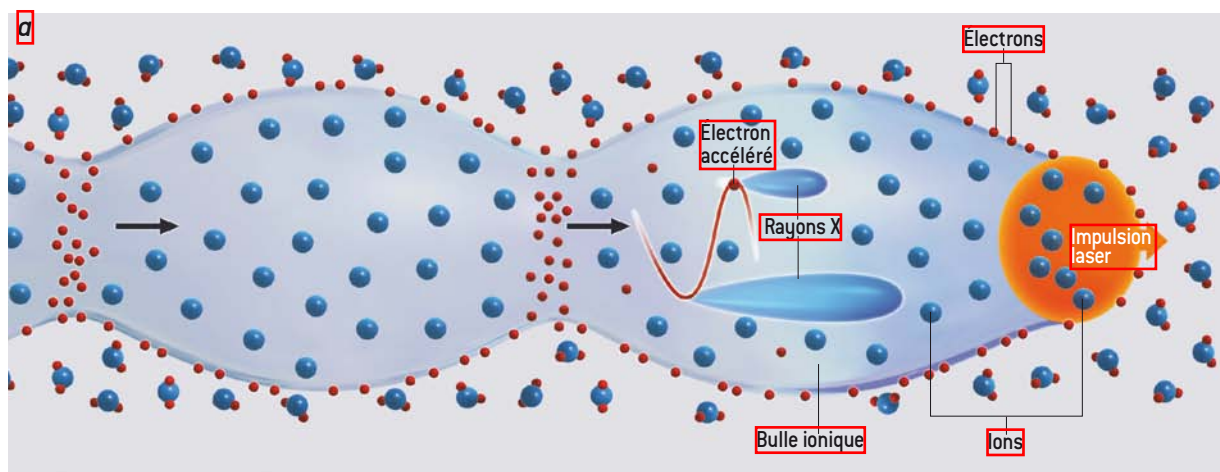
En effet, même s'il est bref, le champ électrique de l'impulsion laser est capable de transmettre tant d'énergie en si peu de temps aux électrons qu'il déshabille instantanément les atomes en leur arrachant leurs nuages électroniques.

Un plasma est créé, c'est-à-dire un mélange d'électrons et d'ions positifs (voir la figure a). Toutefois, les variations violentes du champ électrique de l'impulsion laser dans l'espace exercent sur les charges électriques ce que l'on nomme une pression de radiation perpendiculaire à l'axe. Trop lourds, les ions n'y sont pas sensibles et, restant

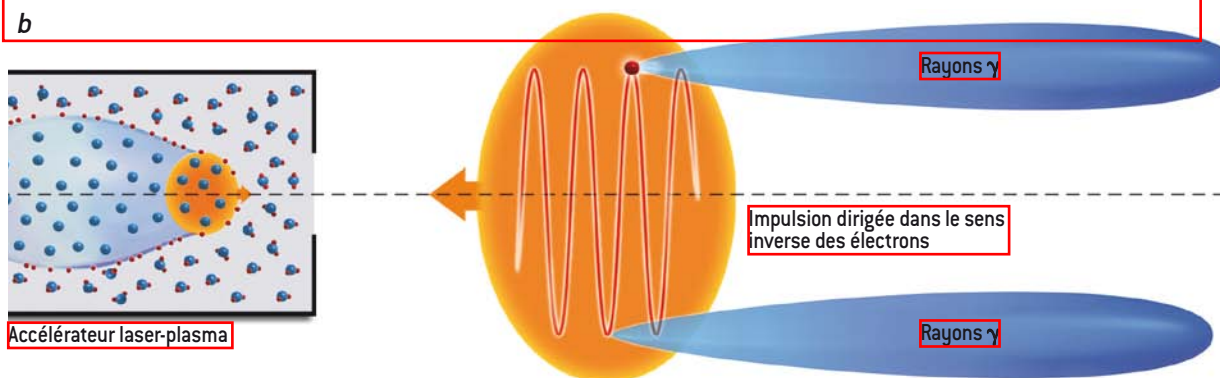
sur place, constituent une bulle ionique dans le sillage de l'impulsion. Très légers en revanche, les électrons libres sont projetés sur les parois de la bulle, puis vers l'arrière où ils finissent par se rejoindre pour fermer la bulle. La présence de tant de charges négatives en arrière de la bulle ionique chargée positivement induit un champ électrique parallèle à l'axe si intense qu'il accélère vers l'avant certains électrons arrachés aux parois de la bulle et leur confère des vitesses très proches de celle de la lumière. Durant toute l'accélération, ces électrons restent dans la bulle. En son sein,

la répartition à symétrie axiale des ions chargés positivement les fait osciller. En effet, chaque fois que ces électrons se trouvent au-dessus de l'axe, la majorité des ions se trouvant sous eux tend à les rappeler vers l'axe, phénomène qui s'inverse dès qu'ils ont franchi ce dernier. Les électrons accélérés zigzaguent fortement autour de l'axe, exactement comme dans un onduleur de synchrotron. C'est à chacun de leurs virages serrés que sont émis des trains de rayons X (voir la figure a).

L'énergie de cette émission lumineuse peut être augmentée encore en envoyant une impulsion lumineuse se propageant dans l'autre sens à la rencontre des électrons accélérés. Quand cette impulsion en croise un, son champ électrique oscillant le fait zigzaguer d'une manière encore plus violente, de sorte que des rayons gamma sont produits (voir la figure b).



LE SILLAGE DE PLASMA qui suit l'impulsion lumineuse ultrabrève sert d'accélérateur grâce aux champs électriques qui s'y établissent. Dû à la séparation électrons-ions, le premier est parallèle à l'axe de propagation et accélère les électrons vers l'avant. Le second, dû à la symétrie axiale de la répartition des ions, est perpendiculaire à la propagation et rappelle les électrons vers l'axe.



UNE IMPULSION LUMINEUSE ULTRABREVE envoyée vers les électrons qui sortent de l'accélérateur laser-plasma les fait osciller dans le champ électrique de l'onde électromagnétique associée. Ils émettent alors à chaque virage des rayons gamma.

celui des synchrotrons, c'est-à-dire qu'ils combinent un accélérateur d'électrons avec un onduleur. Mais dans un laser à électrons libres, tout est gigantesque, raison pour laquelle il n'existe actuellement que trois grandes machines de ce type dans le monde, où la sélection des expériences est encore plus draconienne que dans un synchrotron tel que SOLEIL.

Les accélérateurs laser-plasma

C'est dans ce contexte que des sources de rayons X produits avec des lasers ont été développées : les accélérateurs laser-plasma. L'objectif était de produire des impulsions intenses avec des installations de petite taille et bien moins chères. Il n'était pas question de rivaliser avec les lasers à électrons libres, mais d'obtenir une source d'impulsions X suffisamment intenses et brèves pour un grand nombre d'applications. Un autre objectif était de produire du rayonnement dans une gamme d'énergies que les synchrotrons et les lasers à électrons libres ne peuvent pas atteindre : les rayons γ , ou

LES AUTEURS

Kim TA PHUOC est physicien au Laboratoire d'optique appliquée (LOA) de l'ENSTA (École nationale supérieure de techniques avancées), de l'École polytechnique et du CNRS, à Palaiseau.

Cédric THAURY est physicien au Laboratoire d'optique appliquée.

Sébastien CORDE est postdoctorant au Laboratoire américain de l'accélérateur linéaire (SLAC), à l'Université Stanford aux États-Unis.

gamma. Souvent émis par les noyaux atomiques radioactifs, ces rayonnements électromagnétiques ont des longueurs d'onde à la mesure des phénomènes nucléaires, donc inférieures au diamètre d'un atome. Très énergétique, le rayonnement gamma traverse plusieurs millimètres d'acier, ce qui en fait une forme de radioactivité particulièrement dangereuse ; pour autant, il est aussi le rayonnement approprié pour explorer les structures intra-atomiques.

Or les physiciens ont réussi à créer des sources tenant sur une table, en exploitant les lasers femtosecondes et une compréhension améliorée des interactions laser-matière. Elles permettent de reproduire le principe d'un synchrotron sur une longueur de seulement quelques millimètres, et ainsi d'obtenir d'intenses flashes de rayons X et gamma à l'échelle de la femtoseconde.

Pour produire ces sources, on utilise des lasers femtosecondes dans l'infrarouge. Comme nous l'expliquions au début de cet article, leur puissance de crête – c'est-à-dire la puissance au pic de l'impulsion lumineuse – est de plusieurs dizaines de milliers de gigawatts. Elle n'existe que brièvement,

La SF

POURRA-T-ON UN JOUR RALLUMER

sous les feux
de la science

LE SOLEIL POUR QU'IL NE S'ÉTEIGNE PAS DÉFINITIVEMENT ? CAPTER LA TOTALITÉ DE

L'ÉNERGIE RAYONNÉE PAR UNE ÉTOILE ? DISPOSER D'UN TÉLÉPORTEUR À LA STAR TREK

roland lehoucq

POUR, EN UN CLIGNEMENT DE PAUPIÈRES, FOULER LE SOL D'UNE PLANÈTE LOINTAINE ?



[ESSAIS LE POMMIER !]

Roland Lehoucq - 216 pages - 135 x 200 mm - 20 €

Un autre regard sur la science-fiction

Comme dans son précédent opus, Roland Lehoucq continue à analyser les grands thèmes de la science-fiction grâce aux outils de la science. Il tente ainsi de répondre à toutes les questions que posent ces explorations extraordinaires : le téléporteur de *Star Trek* est-il pour bientôt ? Peut-on, pourra-t-on rallumer le Soleil pour qu'il ne s'éteigne pas définitivement ? Disposer du blaster de *Star Wars* ? Capturer la totalité de l'énergie rayonnée par une étoile ?



Du même auteur :

256 p.
110 x 180 mm
8,50 €



au cours d'impulsions de quelques femto-secondes. La focalisation de ces impulsions ultrabrèves sur des taches de quelques centièmes de millimètre concentre l'énergie dans l'espace et le temps, ce qui produit des champs électromagnétiques extrêmement intenses, capables d'arracher instantanément les électrons des atomes et de transformer ainsi en plasma un gaz ou un solide.

C'est dans ce plasma que sont produits les synchrotrons lasers. Leur principe physique est similaire à celui d'un synchrotron : il faut accélérer des électrons et les faire osciller pour qu'ils émettent du rayonnement. Toutefois, ici, tout se passe à une échelle beaucoup plus petite, car pour accélérer les électrons, on emploie l'onde plasma créée dans le sillage du faisceau laser. Dans ce sillage, le champ électrique de l'impulsion laser sépare les électrons des ions positifs. Cet écartement crée un champ électrique accélérateur pour les électrons qui lui sont extérieurs (voir l'encadré page 50). Tout se passe comme si un surfeur (un électron libre) descendait la vague de sillage d'un puissant navire (l'impulsion lumineuse), dont la pente jouerait le rôle du champ électrique (voir ci-contre). Ce surfeur pourrait ainsi suivre le navire à sa vitesse ; c'est ce que font les électrons accélérés puisqu'ils suivent l'impulsion à peu près à sa vitesse, celle de la lumière...

Des flashes X ultrabrèves...

Les électrons ainsi accélérés parviennent à des énergies dépassant le gigaélectronvolt en quelques millimètres seulement, alors qu'il faut des centaines de mètres pour obtenir la même énergie dans un accélérateur classique. La recherche expérimentale sur les accélérateurs laser-plasma a progressé très vite : alors que les faisceaux d'électrons étaient peu reproductibles et d'énergies modestes il y a quelques années encore, on parvient aujourd'hui à produire des faisceaux ayant des caractéristiques bien contrôlées et des énergies atteignant plusieurs gigaélectronvolts. Le développement technique souhaitable dans les prochaines années consistera à rendre ce type d'accélérateur aussi stable qu'un accélérateur classique, tout en visant des énergies plus importantes.

À partir de tels accélérateurs laser-plasma, on utilise aujourd'hui deux méthodes pour produire des faisceaux de rayons X,

Dans le sillage du laser

Le surf sur le sillage d'un bateau est une métaphore naturelle de l'accélération laser-plasma. L'impulsion lumineuse joue le rôle du bateau, la bulle ionique qui suit le flash est l'analogue de la vague de sillage, et le champ électrique accélérateur créé par les ions et les électrons est analogue à la pente de cette vague. Ainsi, tel un surfeur qui descend la vague de sillage à la vitesse du bateau, un électron est propulsé par le champ électrique quasiment à la vitesse de la lumière.



PHOTO: J. L. DUBOIS

BIBLIOGRAPHIE

V. Malka et al., Accélérateurs à plasma laser : principes et applications, *Reflète de la Physique* n° 33, mars 2013.

S. Corde et al., Femtosecond X rays from laser-plasma accelerators, *Reviews of Modern Physics*, vol. 85, p. 1, 2013.

C. Joshi, Surfer sur des ondes de plasma, *Pour la Science* n° 341, mars 2006.

toutes deux démontrées au Laboratoire d'optique appliquée (LOA, une unité mixte du CNRS, de l'ENSTA et de l'École polytechnique). La première est inhérente à l'accélérateur laser-plasma lui-même. Les électrons piégés et accélérés dans l'onde de sillage subissent également un champ électrique à symétrie axiale perpendiculaire au champ accélérateur. Ce champ fait osciller les électrons de part et d'autre de l'axe de propagation avec une période de l'ordre de la centaine de micromètres, ce qui conduit, exactement comme dans un synchrotron, à l'émission d'un flash de rayonnement X, que l'on appelle le rayonnement bêta-tron.

...et des flashes gamma

La longueur d'onde de ce rayonnement est de l'ordre de l'angström, soit la longueur d'onde intéressante pour de nombreuses applications. Il est émis dans un cône dont l'angle d'ouverture est de l'ordre du degré, et il ne dure que quelques femtosecondes. Cette courte durée est liée à la brièveté des paquets d'électrons accélérés dans le sillage. Le rayonnement bêta-tron a aussi la caractéristique très intéressante d'être émis depuis une toute petite surface, dont la taille est de l'ordre du micromètre. Cela rend possible la radiographie à très haute résolution ou encore la radiographie à contraste de phase, une méthode permettant de voir des détails invisibles en radiographie classique.

La seconde méthode permet de produire du rayonnement aux propriétés similaires au rayonnement bêta-tron, mais de longueurs d'onde bien plus courtes. Très récemment démontrée, elle nécessite une seconde impulsion laser intense issue du même système laser et se propageant dans le sens inverse des électrons. Quand elle rencontre les électrons, cette impulsion les fait osciller avec une période extrêmement courte. Des rayons gamma sont ainsi produits sous la forme de flashes des milliers de fois plus brillants que ceux de toute source existante dans cette gamme d'énergie (voir l'encadré page 50).

Cette nouvelle source de flashes gamma ultrabrèves ouvre des perspectives formidables de développement, car elle permet de produire avec un même instrument des faisceaux dans une large gamme spectrale, allant des rayons X aux rayons gamma. Il suffit pour cela d'ajuster l'énergie des électrons dans l'accélérateur laser-plasma,

par exemple en changeant la longueur du plasma. Plus les électrons seront énergétiques, plus le rayonnement sera de courte longueur d'onde.

Les synchrotrons lasers sont encore des instruments de recherche fondamentale, mais leur principe est démontré. Pour les rendre accessibles et fiables, il faut maintenant un effort d'ingénierie. Aujourd'hui, une telle source tient dans une pièce d'environ 50 mètres carrés et coûte quelques centaines de milliers d'euros, l'essentiel du coût provenant du système laser. À l'avenir, les lasers de puissance devraient devenir plus compacts, mais aussi moins chers, et les applications de ces nouvelles sources X pourraient se répandre dans les laboratoires.

Néanmoins, de premières applications ont déjà été réalisées. Dans la gamme des rayons X, le rayonnement bêta-tron a permis de mettre en évidence la fusion de semi-conducteurs, phénomène qui ne dure que quelques centaines de femtosecondes. Il a aussi servi à radiographier, avec un seul flash de rayonnement et une très haute

résolution, de petits spécimens d'intérêt biologique, permettant de voir instantanément des détails qui n'auraient pas pu être révélés par une radiographie classique (voir la figure 4). À plus haute énergie, le rayonnement produit par un synchrotron laser ouvre une gamme d'applications importantes en radiographie industrielle. Très énergétique, le rayonnement gamma permet par

On peut pronostiquer que les travaux engagés aboutiront bientôt à une nouvelle génération de sources X.

exemple d'inspecter l'intérieur des pièces métalliques ou d'épais objets pour y détecter d'éventuels défauts.

Des projets liés à la sécurité sont aussi en cours, notamment pour créer des sources servant à inspecter le contenu de camions. Des applications médicales sont aussi envisagées, en particulier une forme de radiographie à haute résolution qui permettrait

de mettre en évidence plus de détails qu'en radiographie classique.

Il faudra encore quelques années de développement avant que ces sources deviennent des instruments de travail accessibles. L'investissement en vaut la peine, car leur principe technique promet de les rendre bien plus compactes et moins onéreuses que les sources habituelles.

Déjà aussi brillants qu'un synchrotron dans le domaine des rayons X et des milliers de fois plus brillants que toute source existante dans le domaine gamma, les synchrotrons lasers devraient se révéler extrêmement utiles à l'avenir.

Aujourd'hui, de nombreux laboratoires se sont équipés de systèmes laser commerciaux et se sont lancés dans cette direction de recherche prometteuse. On peut pronostiquer que les travaux engagés aboutiront bientôt à une nouvelle génération de sources X et gamma compactes, qui trouveront de multiples usages, que ce soit en physique, en chimie, en médecine ou dans l'industrie. ■

Épatez vos amis avec 50 expériences scientifiques incroyables !



Jack Guichard et Guy Simonin - Relié sous spirale, 168 pages, 170 x 210 mm, 18,90 €

Retournez votre verre de vin sans en perdre une goutte, transformez l'eau en vin, créez un nuage dans une bouteille, mettez une olive en lévitation ! Des expériences très faciles à réaliser et enrichies d'une explication simple et compréhensible des phénomènes scientifiques en jeu.



Le plus puissant faisceau de rayons X

Nora Berrah et Philip Bucksbaum

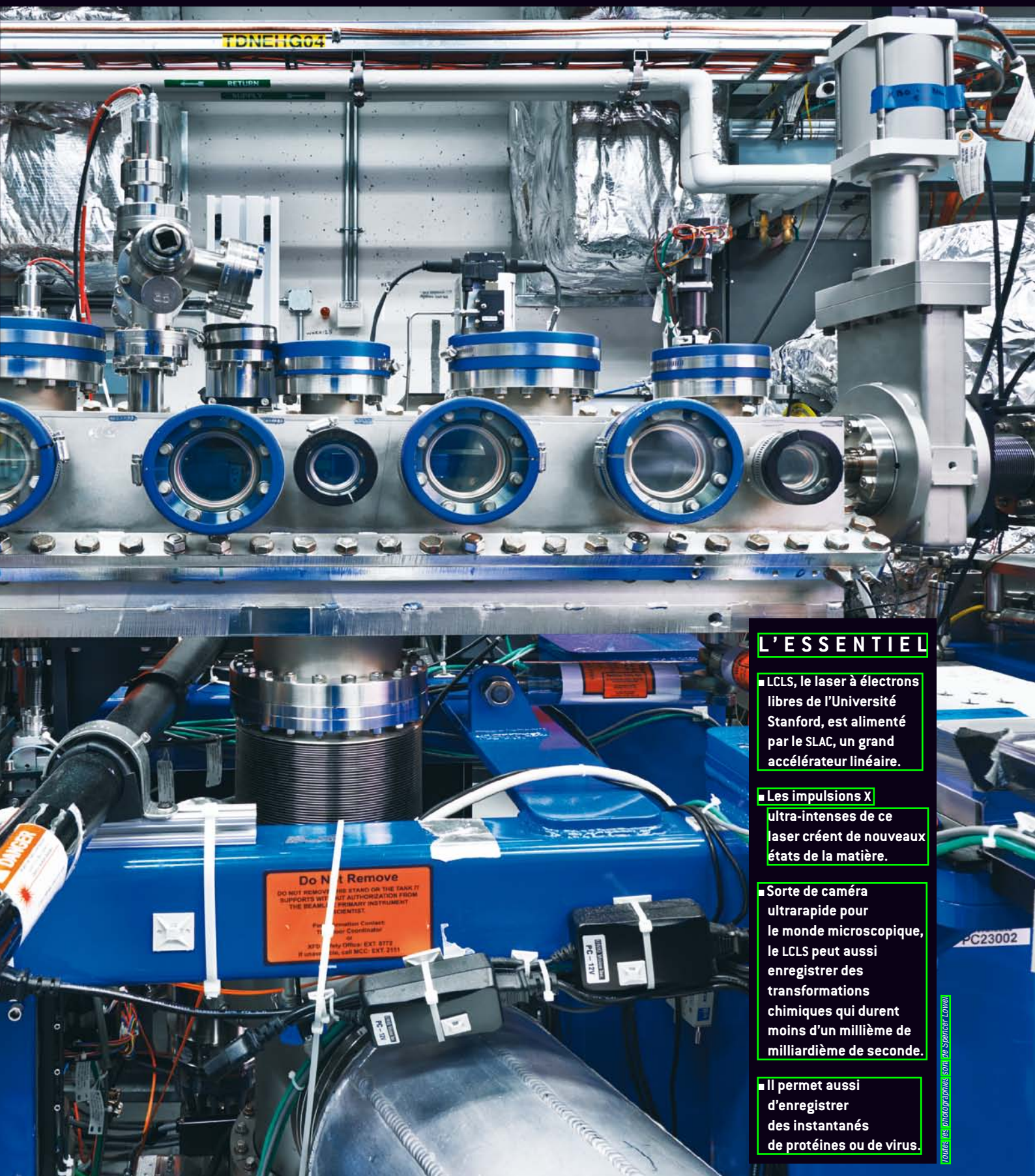
Le grand accélérateur linéaire de l'Université Stanford a été converti en laser à électrons libres. Il a ainsi donné naissance à la plus intense source de rayons X du monde.

Porter en moins d'un milliardième de seconde un groupe d'atomes ou une poussière à un million de degrés. Voilà ce que peut faire de façon routinière le plus puissant des lasers dits à électrons libres : le LCLS, un laser à rayons X installé dans le tunnel de l'accélérateur linéaire de Stanford (le SLAC, ou *Stanford Linear Accelerator Center*). Un atome de néon soumis au rayonnement du LCLS perd par exemple quasi instantanément ses dix électrons. Privé de son nuage électronique protecteur, il est projeté de façon quasi explosive loin des atomes voisins, et laisse derrière lui un sillage de destructions, qui intéresse beaucoup les physiciens.

Depuis son entrée en fonction en 2009, le LCLS joue en physique atomique et des plasmas, en chimie, en physique de la matière condensée et en biologie le rôle pionnier que joue en physique des particules élémentaires le LHC, le grand collisionneur du Cern. Exploitant les chocs violents qu'il administre, les physiciens préparent la matière dans des états extrêmes, tel celui de cet atome de néon quasi instantanément vidé de ses électrons. Ils se servent aussi du LCLS comme d'une sorte de caméra ultrarapide pour suivre l'évolution de systèmes quantiques, par exemple une molécule en train de réagir avec une autre. Le LCLS sert aussi à révéler la structure de protéines et de molécules biologiques, quand les autres sources de rayons X en sont incapables.



1. CETTE CHAMBRE À VIDE
(la structure aux hublots bleus) contient des miroirs conçus pour concentrer en un point de la taille d'une poussière le plus puissant des faisceaux X existants.



L'ESSENTIEL

■ LCLS, le laser à électrons libres de l'Université Stanford, est alimenté par le SLAC, un grand accélérateur linéaire.

■ Les impulsions X ultra-intenses de ce laser créent de nouveaux états de la matière.

■ Sorte de caméra ultrarapide pour le monde microscopique, le LCLS peut aussi enregistrer des transformations chimiques qui durent moins d'un millième de milliardième de seconde.

■ Il permet aussi d'enregistrer des instantanés de protéines ou de virus.

Toutes les photographies sont de Spencer Lawler

LES AUTEURS



Norah BERRAH dirige le département de physique de l'Université du Connecticut, aux Etats-Unis, où elle travaille notamment à la construction d'instruments de mesure pour le LCLS.

Philip BUCKSBAUM est professeur de physique à l'Université Stanford et au SLAC, où il dirige l'Institut PULSE consacré aux recherches utilisant les lasers ultrabrefs et le LCLS.

L'invention du laser à électrons libres

L'invention du principe du laser à électrons libres est généralement attribuée à John Madey, aujourd'hui professeur de physique à l'Université d'Hawaï. Étudiant dans les années 1960 au Caltech, il eut une discussion avec des camarades sur les moyens de renforcer le rayonnement de freinage d'une particule chargée (nommé Bremsstrahlung). De cette question naquit toute une carrière vouée au développement technique du laser à électrons libres et qui s'est déroulée à l'Université Stanford, puis à l'Université Duke.

LCLS est le sigle de *Linac Coherent Light Source*, soit « source cohérente de lumière de l'accélérateur linéaire ». L'essentiel de son principe découle des techniques employées dans tous les grands accélérateurs de particules. De fait, le LCLS est un détournement du SLAC, c'est-à-dire du grand accélérateur linéaire exploité depuis 1962 par l'Université Stanford. Avant de devenir le LCLS, le SLAC était bien connu : c'est à cet accélérateur que les États-Unis doivent les grandes découvertes et les nombreux prix Nobel qui les ont maintenus à la pointe de la physique des particules élémentaires pendant des décennies.

Suivre le mouvement des atomes ?

Le laser à rayons X qu'est le LCLS combine les deux principaux outils utilisés par les physiciens expérimentateurs d'aujourd'hui : les sources de rayonnement synchrotron et les lasers ultrabrefs. Les synchrotrons, rappelons-le, sont de grands instruments construits à l'aide d'électroaimants et de cavités à champs électriques afin d'accélérer sur une trajectoire circulaire des particules chargées. En raison de l'accélération centripète (due à la courbure) qu'elles subissent, ces particules émettent un rayonnement dirigé essentiellement selon la tangente à la trajectoire : c'est le rayonnement synchrotron. Lorsque l'accélération est forte, ce rayonnement est composé surtout de rayons X, qui font le bonheur des physiciens dans toutes sortes d'explorations de la matière (voir l'article *Produire des rayons X et γ sur une table*, page 46).

L'une d'entre nous (N. Berrah) consacre sa carrière à l'étude de l'intérieur des atomes, des molécules et de tous les systèmes de taille nanométrique à l'aide du rayonnement synchrotron. Les rayons X sont en effet l'outil idéal de ce type de recherche, car leurs longueurs d'onde – de 0,01 à 10 nanomètres – couvrent les tailles atomiques (vers 0,1 nanomètre) et moléculaires (vers 1 nanomètre). Pour cette raison, les rayons X que diffracte une structure de taille nanométrique emportent sur cette dernière des informations. Les rayons X ont aussi l'intérêt de pouvoir être réglés de façon à correspondre à des atomes particuliers, tels ceux de fer, ce qui permet par exemple de les situer au sein d'une grande molécule, telle l'hémoglobine.

Toutefois, il y a une chose que le rayonnement synchrotron ne fait pas : suivre les mouvements de la matière les plus intimes, ceux qui se produisent au sein d'une molécule ou de la matière solide. Le problème est que les rayons X produits à l'aide d'un synchrotron ne sont ni assez brefs ni assez intenses.

Le rayonnement synchrotron ne suffit pas non plus à lire la structure d'une molécule isolée. Actuellement, pour déterminer la structure d'une molécule à l'aide du rayonnement synchrotron, il faut en aligner des exemplaires par millions, pour leur faire former un cristal, lequel n'est pas toujours facile à obtenir.

D'où l'idée de recourir à des lasers à rayons X, beaucoup plus intenses, puisque leur rayonnement est composé d'une seule grande onde électromagnétique, plutôt que d'ondes se propageant indépendamment. Nommée cohérence, cette caractéristique permet de concentrer le faisceau et son énorme énergie en un point minuscule. Les faisceaux laser ont aussi l'avantage de pouvoir s'allumer et s'éteindre en une femtoseconde (10^{-15} seconde). L'un d'entre nous (P. Bucksbaum) emploie des impulsions laser ultrabèves pour éclairer en saccade le mouvement des atomes ou une réaction chimique, exactement comme on éclaire au stroboscope le mouvement d'une roue.

Les lasers les plus courants fonctionnent dans le visible ou tout près. Les longueurs d'onde correspondantes (0,4 à 0,8 micromètre) sont quelque mille fois supérieures à celles requises pour distinguer des atomes individuels. De la même manière qu'un radar météorologique montre une tempête mais pas ses gouttes de pluie, les faisceaux laser émettant dans le domaine visible détectent les ensembles d'atomes mais pas les atomes eux-mêmes. Pour qu'un objet atomique diffracte un rayonnement cohérent de façon mesurable, il faut que la longueur d'onde de ce dernier soit au moins aussi petite que lui, donc dans la gamme des rayons X. Bref, pour éclairer le monde atomique et moléculaire, il faut disposer d'un laser à rayons X !

Il fut un temps où l'idée même de construire un laser émettant des rayons aussi énergétiques que des rayons X paraissait absurde. Les lasers courants exploitent la capacité des atomes à absorber et à restituer des photons. Le plus souvent, après



2. LE FAISCEAU X
parcourt un tube reliant
les deux salles d'expé-
riences du laser à
électrons libres du Centre
de l'accélérateur linéaire
de Stanford, le SLAC.

avoir absorbé l'énergie d'une telle particule de lumière, un atome finit par la libérer spontanément. Mais quand ? Au début du XX^e siècle, Albert Einstein a découvert un moyen de déclencher cette émission : c'est ce que l'on nomme l'émission stimulée. Cet effet est exploité pour obtenir des lasers. Pour cela, il faut exciter en permanence toute une population d'atomes, c'est-à-dire leur faire absorber des photons d'énergie choisie. Un atome se désexcite en émettant un photon, lequel déclenchera l'émission, par un autre atome excité, d'un photon identique au premier et en phase ; le phénomène se poursuit ensuite et s'amplifie. C'est cette réaction en chaîne qui produit une émission laser cohérente et conséquente.

En réalité, la probabilité qu'un atome excité qui reçoit un photon incident émette un photon est assez faible. Dans la plupart des cas, l'atome libère spontanément l'énergie absorbée avant qu'une interaction avec un photon incident n'ait pu avoir lieu. Dans les lasers habituels, on surmonte cette limite en multipliant les occasions d'interaction. Pour cela, on place le milieu émetteur entre deux miroirs afin de multiplier les parcours des photons. Dans les lasers à hélium-néon des scanners de supermarché par exemple, un flot continu d'électrons entre en collision avec les atomes d'un gaz, et la lumière produite est renvoyée 200 fois par les miroirs afin de constituer un faisceau suffisant.

Abattre en vol des satellites et des missiles balistiques

Dans le cas d'un laser X, chaque étape de ce processus se complique. Un photon X contient facilement 1000 fois plus d'énergie qu'un photon de lumière visible. Un atome recevant une telle particule de lumière doit donc absorber 1000 fois plus d'énergie, qu'il ne pourra retenir bien longtemps. Un autre point est que des miroirs pour rayons X sont très difficiles à fabriquer. Bien que ces difficultés ne soient pas insurmontables, elles signifient en pratique que, pour créer les conditions d'une émission laser X, une énorme quantité d'énergie est nécessaire.

Le premier laser X ayant jamais existé tirait son énergie d'un essai nucléaire souterrain. Il fut construit dans le cadre du projet secret *Excalibur* mis en œuvre par le Laboratoire américain Lawrence

Livermore, situé à l'Est de San Francisco. Ce projet constituait l'un des pans de l'Initiative de défense stratégique (dite « Guerre des étoiles »), lancée par le président Ronald Reagan dans les années 1980, dans le but d'abattre en vol des satellites et des missiles balistiques.

Durant ces années, le Laboratoire Lawrence Livermore a élaboré une première version de laser X non nucléaire en utilisant l'énergie fournie par les puissants lasers optiques construits pour tester les propriétés des armes nucléaires. Toutefois, il ne s'agissait pas encore d'instruments utilisables au quotidien dans la pratique de la recherche, possibilité qui semblait alors encore fort lointaine. On doit à l'Université Stanford la percée qui a permis de développer des lasers X civils. Depuis les années 1960, cette institution exploitait l'accélérateur linéaire d'électrons le plus

long du monde : le SLAC. Long de trois kilomètres, cet appareil servait alors à accélérer de denses paquets d'électrons jusqu'à des vitesses extrêmement proches de celle de la lumière.

Un onduleur géant

Il y a une dizaine d'années, l'agence de tutelle du SLAC a décidé de le convertir en ce que l'on nomme un laser à électrons libres. Le dispositif utilisé dans les synchrotrons modernes pour produire des faisceaux X intenses – un onduleur – a donc été ajouté au SLAC. Les onduleurs sont constitués d'une série d'aimants disposés de façon à créer un champ magnétique alternant. Les électrons qui les parcourent zigzaguent en émettant du rayonnement synchrotron à chaque virage. Dans les synchrotrons, les électrons circulent dans un anneau

où sont insérés des onduleurs. À chaque passage des électrons dans l'onduleur, le rayonnement X émis est dirigé vers une salle d'expériences.

L'accélérateur du SLAC a été doté d'un onduleur de pas moins de 130 mètres de long. Les électrons y circulent sur la même trajectoire rectiligne que les photons et presque à la même vitesse. Pour cette raison, de nombreux électrons se trouvent sur le chemin de photons X émis par ceux qui les précèdent de peu. Or le champ magnétique oscillant associé à ces photons contribue aussi à faire osciller les électrons. L'émission de rayonnement synchrotron s'amplifie ainsi, jusqu'à atteindre une valeur de saturation. Cette forme d'émission autostimulée produit un faisceau cohérent et d'une très grande luminosité, sans qu'aucun miroir à rayons X n'ait été nécessaire.

COMMENT LE LASER A ÉLECTRONS LIBRES LCLS FONCTIONNE

Alimenté par un accélérateur linéaire, le LCLS constitue une sorte de version gigantesque des canons à électrons des anciens téléviseurs, sauf qu'il accélère les électrons

jusqu'à des vitesses très proches de celles de la lumière. L'élément essentiel de la machine est constitué par un onduleur, c'est-à-dire une alternance de gros aimants

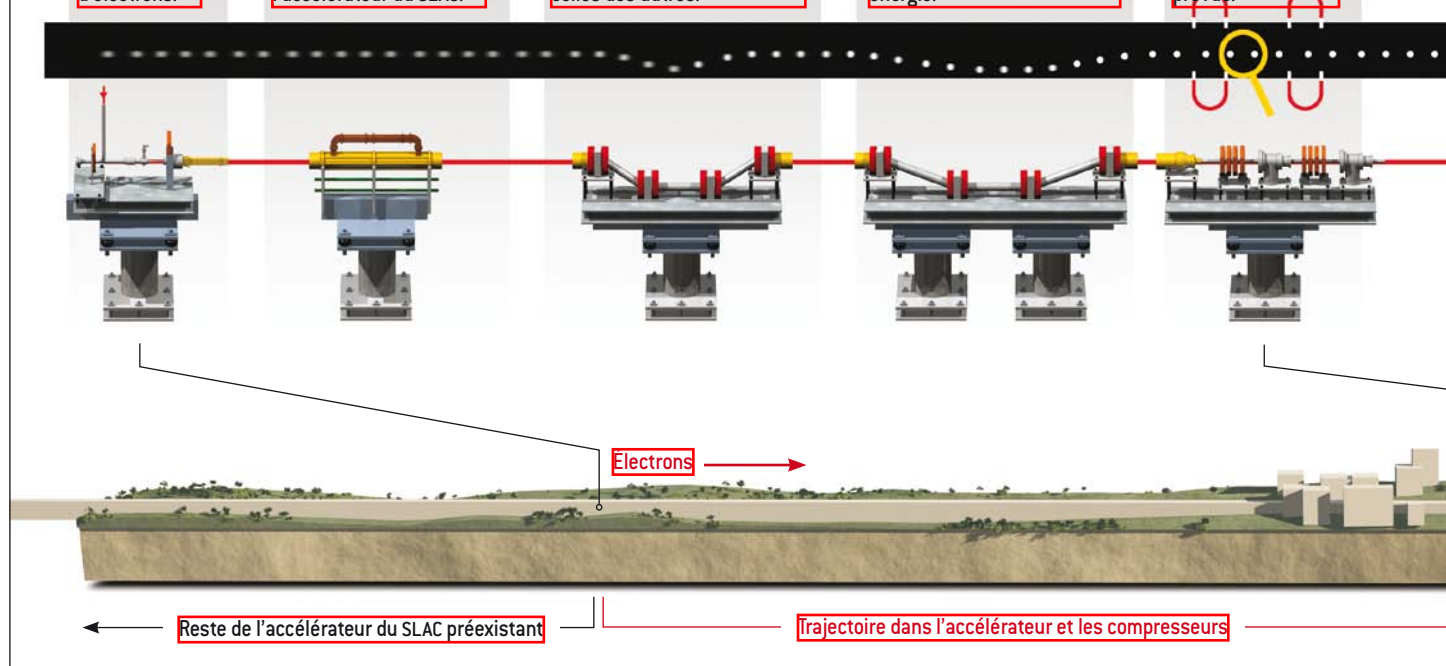
LASER PILOTE
Il envoie des impulsions de lumière ultraviolette pour extraire d'une cathode des bouffées d'électrons.

ACCÉLÉRATEUR
Des champs électriques accélèrent ces paquets d'électrons jusqu'à une énergie de 12 giga-électronvolts. Pour cela, le LCLS utilise un tiers de la longueur totale de l'accélérateur du SLAC.

COMPRESSEUR DE PAQUETS 1
Les paquets d'électrons passent par une courbe en S. Son rôle est de constituer des paquets d'électrons volant ensemble, en éliminant les électrons dont les vitesses ne sont pas assez proches de celles des autres.

COMPRESSEUR DE PAQUETS 2
Après une nouvelle accélération, les paquets d'électrons entrent dans un second compresseur, qui doit être plus long que le premier puisque les électrons ont maintenant une plus grande énergie.

PRÉPARATEUR
Des aimants concentrent les impulsions, et l'on vérifie à l'aide de capteurs que les électrons sont bien sur la trajectoire prévue.



Tout ce qu'il faut pour obtenir une telle émission laser est un espace assez grand pour loger un très long onduleur et un faisceau d'électrons libres – des conditions que réunissait le SLAC, étant donné son tunnel de trois kilomètres. Au bout de la ligne, les électrons sont déviés avant que les photons ne pénètrent dans les chambres expérimentales. Si tout est parfaitement aligné, le tour est joué, et l'on obtient un faisceau ultra-intense.

Gigantesque intensité

L'intensité du LCLS est gigantesque : elle atteint 10^{18} watts par centimètre carré au pic de l'impulsion, soit des milliards de fois plus que ce que produisent les synchrotrons. Son champ électromagnétique étant 1 000 fois plus élevé que les champs qui lient les atomes les uns aux autres au

sein de la matière ou des molécules, un tel laser découpe facilement l'acier.

Le LCLS a un tel succès que ses gestionnaires ne peuvent répondre favorablement qu'à une demande d'utilisation sur quatre. Les scientifiques du site travaillent avec de grosses équipes de visiteurs (étudiants, postdoctorants et chercheurs confirmés) et tous sont engagés dans de véritables marathons de 12 heures par jour pendant cinq jours. Chaque microseconde compte.

Les lasers à rayons X servent dans toute une variété de recherches qu'il serait trop long de détailler ici. Pour en donner une idée, nous nous restreindrons ici à deux thèmes : le comportement de la matière dans des conditions extrêmes et l'imagerie ultrarapide de molécules. Ces thèmes sont tous deux intimement liés aux processus fondamentaux étudiés en physique atomique, moléculaire et optique.

Un atome visé par le faisceau du LCLS est l'un des exemples les plus simples de matière poussée dans un état extrême. C'est ce que l'on nomme un atome creux, car le faisceau ne lui fait pas perdre ses électrons d'un seul coup, mais l'évide par le fond. Les couches électroniques externes sont en effet quasi transparentes aux rayons X ; c'est la couche la plus interne qui absorbe ce rayonnement. Les deux électrons de cette couche sont éjectés, laissant un espace vide à la base du nuage électronique de l'atome. En quelques femtosecondes, deux électrons des couches supérieures viennent occuper les deux places vacantes, puis absorbent le rayonnement, de sorte que le processus d'évidement par l'intérieur de l'atome « creux » continue jusqu'à ce qu'il ne reste plus aucun électron. Ce processus est nommé relaxation Auger. Il se produit

imprimant aux électrons un mouvement en zigzags. Chaque fois qu'ils doivent changer de direction, les électrons émettent des rayons X, qui contribuent à les faire zigzaguer

davantage, de sorte que l'émission X produite s'autoamplifie. Cela produit *in fine* un faisceau exceptionnellement pur et intense.

ONDULEUR

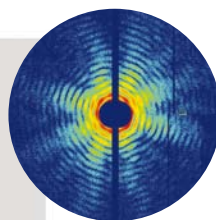
Une série d'aimants de polarités alternées impriment des zigzags aux électrons. À chaque virage brusque, ces derniers émettent un rayonnement synchrotron, ici un faisceau de rayons X.

TRIEUR DE FAISCEAUX

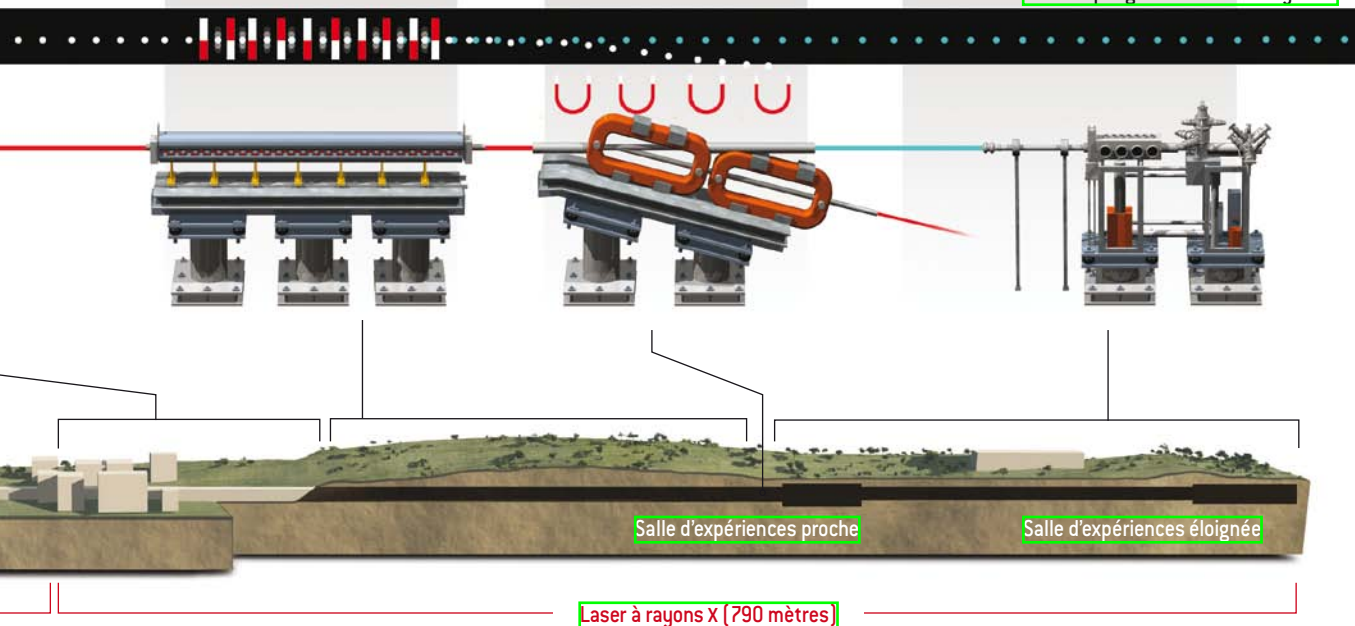
Un puissant aimant dévie le faisceau d'électrons et laisse le faisceau de rayons X poursuivre son chemin.

SALLE D'EXPERIENCES

Les rayons X pénètrent la matière et y accomplissent leur tâche. Par exemple, ils livrent une image détaillée de la structure interne d'un virus (*ci-contre*).



Bactériophage visualisé aux rayons X



Laser à rayons X (790 mètres)



3. LES DÉTECTEURS PLACÉS DANS CETTE CHAMBRE À VIDE fournissent des images d'ultra haute résolution de protéines et de cellules au moment où une impulsion X les éclaire.

avec des molécules, comme avec des atomes pris dans la matière solide.

L'état exotique de la matière qui en résulte n'existe que quelques femtosecondes. Dans les solides, il évolue en matière dense et chaude, une sorte de plasma que l'on ne rencontre habituellement que dans les conditions extrêmes du cœur d'une planète géante où en cas de fusion nucléaire. Il n'a en tout cas aucun équivalent sur Terre.

Or le LCLS peut servir de caméra rapide afin de saisir la façon dont se créent les atomes creux. Comme les relaxations Auger durent quelques femtosecondes, il est possible avec le LCLS de diriger une impulsion X d'une femtoseconde sur un système atomique en voie d'évidement avant qu'un électron externe ait le temps de rejoindre les places vacantes de la couche interne. C'est ce que nous avons fait non seulement pour des atomes, mais également pour des molécules et des échantillons de matière.

Simuler l'intérieur des planètes gazeuses

Une autre application du LCLS est la simulation des conditions extrêmes régnant au sein des géantes gazeuses. Selon les théories existantes, les températures à l'intérieur de Jupiter, Saturne, Uranus ou encore Neptune atteignent 20 000 degrés, soit environ quatre fois la température de surface du Soleil. Les principaux constituants de la planète que sont l'hydrogène et l'hélium doivent se trouver sous la forme

de phases solides exotiques, de densités extrêmes. Toutefois, nous en savons peu, car la résistance d'une telle matière et la façon dont elle se comprime ne sont ni faciles à mesurer, ni bien comprises en théorie. Pour le moment, la recherche sur de tels états de la matière n'a pu qu'être théorique, et les expériences de validation des modèles ont été rares.

Certaines des premières expériences conduites au LCLS ont été menées pour recréer ces conditions internes aux planètes gazeuses. L'intensité colossale du laser chauffe la matière très rapidement, produisant des effets extraordinaires. Nous avons par exemple observé pour la première fois une absorption multiphotonique X, c'est-à-dire comment plusieurs photons X peuvent être absorbés par des molécules constituées de nombreux atomes, ce qui libère des électrons fortement liés.

Un groupe assez dense de tels photons peut aussi arracher de multiples électrons à un atome, à une molécule ou à un élément de matière, et les vider de l'intérieur comme décrit plus haut. Les rayons X de forte intensité peuvent en outre casser quasi instantanément toutes les liaisons au sein de molécules supposées se trouver à l'intérieur des planètes géantes, dont l'eau, le méthane et l'ammoniac. Les mesures de la matière dans des conditions extrêmes ont permis de déterminer l'équation d'état de la matière (relation entre température, pression et densité) au cœur des géantes gazeuses ou durant les impacts météoritiques.

Quant à l'exploitation du laser comme caméra X ultrarapide, elle pourrait combler de sérieuses lacunes dans nos connaissances en réalisant des instantanés de molécules en train de réagir ou encore de processus physiques, chimiques et biologiques rapides.

On connaît peu en effet la structure de nombreuses molécules biologiques, en particulier des protéines membranaires et des gros complexes protéiques. La technique standard, la cristallographie, suppose de former ces molécules en une structure cristalline assez importante et régulière pour diffracter le rayonnement synchrotron. Les motifs résultants révèlent la structure de la molécule. La faiblesse de cette méthode tient au fait que les rayons X endommagent facilement les molécules. Pour compenser, les chercheurs doivent préparer de gros cristaux, mais de nombreuses molécules intéressantes (dont les protéines membra-

BIBLIOGRAPHIE

L. Redecke *et al.*, *Natively inhibited Trypanosoma brucei cathepsin B structure determined by using an X-ray laser*, *Science*, vol. 339, pp. 227-230, 2013.

S. M. Vinko *et al.*, *Creation and diagnosis of a solid-density plasma with an X-ray free electron laser*, *Nature*, vol. 482, pp. 59-63, 2012.

H. N. Chapman *et al.*, *Femtosecond X-ray protein nanocrystallography*, *Nature*, vol. 470, pp. 73-77, 2011.

M. M. Seibert *et al.*, *Single Mimivirus particles intercepted and imaged with an X-ray laser*, *Nature*, vol. 470, pp. 78-81, 2011.

N. Berrah *et al.*, *Double core-hole spectroscopy for chemical analysis with an intense X-ray femtosecond laser*, *PNAS*, vol. 108(41), pp. 16912-16915, 2011.

L. Young *et al.*, *Femtosecond electronic response of atoms to ultra-Intense X-rays*, *Nature*, vol. 466, pp. 56-61, 2010.

naïres) sont très difficiles à faire cristalliser. L'exploitation du rayonnement synchrotron pour analyser des molécules biologiques est de surcroît lente, donc inutile pour observer les phénomènes chimiques transitoires qui se produisent à l'échelle de la femtoseconde.

Au premier abord, le LCLS semble être un outil totalement inadapté pour analyser de fragiles macromolécules organiques. Une seule impulsion de ses rayons X suffit en effet à détruire les matériaux organiques ou toute matière non cristalline. Toutefois, la brièveté de l'impulsion X et son intensité permettent de capturer une image en moins de temps que la molécule n'en met à exploser. Certes, le laser détruit l'échantillon, mais il en prend néanmoins une image claire avant sa disparition.

Cette méthode dite de la « diffraction avant destruction » commence déjà à produire des fruits. Les chercheurs ont utilisé la cristallographie femtoseconde pour enregistrer des motifs de diffraction de nanocristaux, de protéines et de virus

(voir l'encadré pages 58 et 59). Au cours de travaux récents, des chercheurs ont ainsi cartographié la structure de protéines impliquées dans la maladie du sommeil.

Outre le LCLS, des laboratoires européens et asiatiques préparent ou construisent de nouveaux gros lasers à électrons libres. En Europe, le centre allemand de recherche

Amplifying Spontaneous Emission, émission spontanée auto-amplificatrice). Après avoir longtemps servi de machine pilote, FLASH est à la disposition des chercheurs depuis 2005. L'expérience accumulée avec FLASH est actuellement réinvestie par le centre DESY dans la construction du laser XFEL (*European X-ray Free-Electron Laser*), qui doit entrer en fonctionnement en 2016 à Hambourg.

Cette nouvelle génération de machines sera plus stable et dotée de faisceaux plus faciles à contrôler, et aux impulsions plus brèves encore. Avec des impulsions de seulement 0,1 femtoseconde, nous pourrions en effet commencer à observer non seulement le mouvement des atomes, mais aussi celui des électrons atomiques ou moléculaires. De nouveaux dispositifs pourraient même nous permettre de contrôler ce mouvement. Le rêve de réaliser des films montrant comment les liaisons chimiques se cassent, puis comment de nouvelles liaisons se forment à leur place, est maintenant à notre portée. ■

LE RÊVE DE FILMER

comment les liaisons chimiques se cassent et comment de nouvelles se forment est maintenant à notre portée.

fondamentale DESY (*Deutsches Elektronen Synchrotron*) a innové très tôt en construisant dès les années 1990 une machine pour tester le principe des lasers à électrons libres : le laser TESLA rebaptisé depuis *Free Electron Laser Hamburg* ou FLASH. C'est là que fut démontrée en 2001 la possibilité même de produire un rayonnement laser à partir d'un faisceau d'électrons en exploitant l'émission auto-amplifiée décrite plus haut. Cet effet est nommé l'effet SASE (*Self*

france culture C'EST POUR VOUS

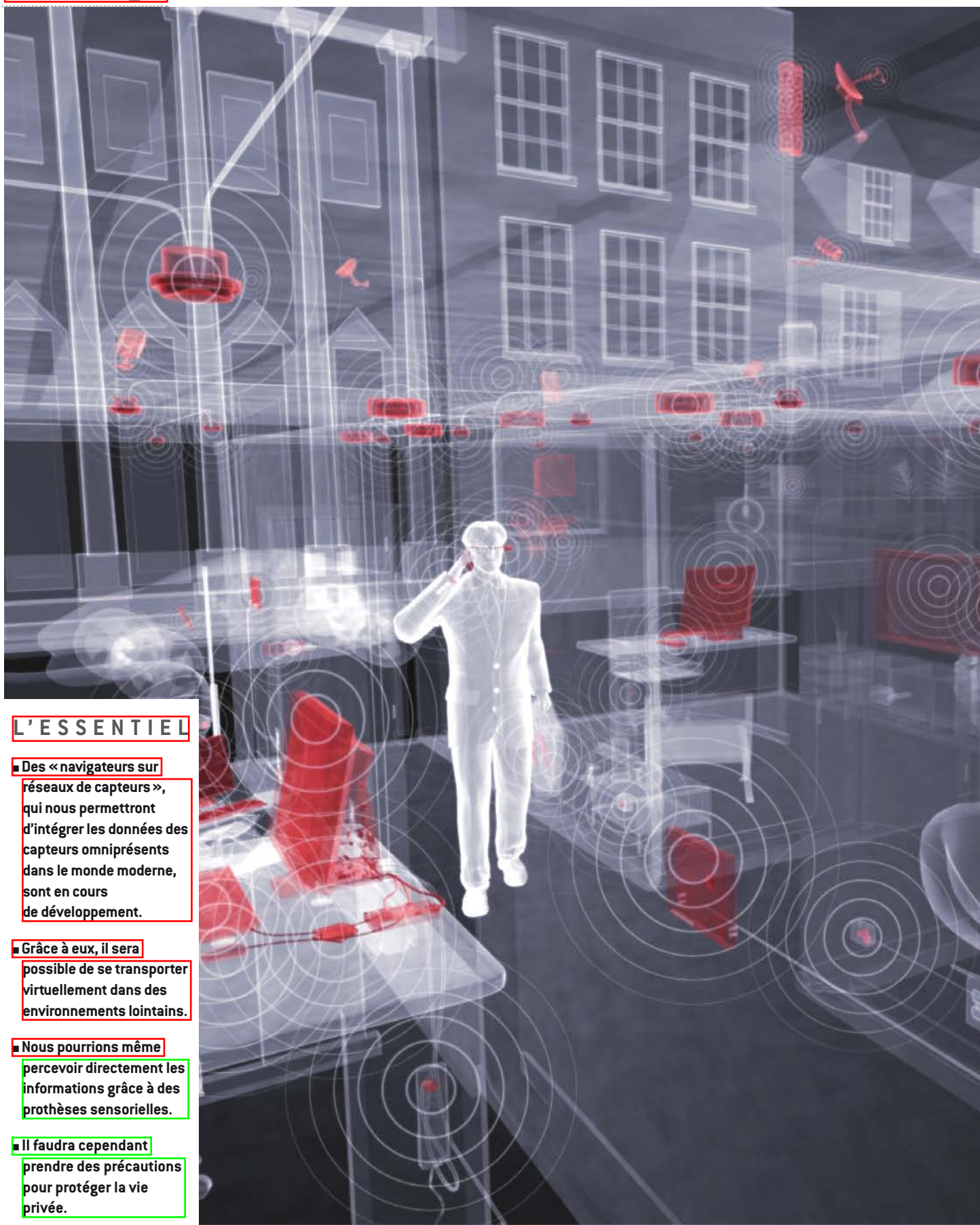
LA MARCHÉ DES SCIENCES

AVENTURES SAVANTES AU FIL DE L'HISTOIRE
AURÉLIE LUNEAU / JEUDI 14H - 15H

EN PARTENARIAT AVEC **POUR LA SCIENCE**

écoutez réécoutez et podcastez l'émission sur franceculture.fr

QR code and social media icons (Facebook, Twitter)



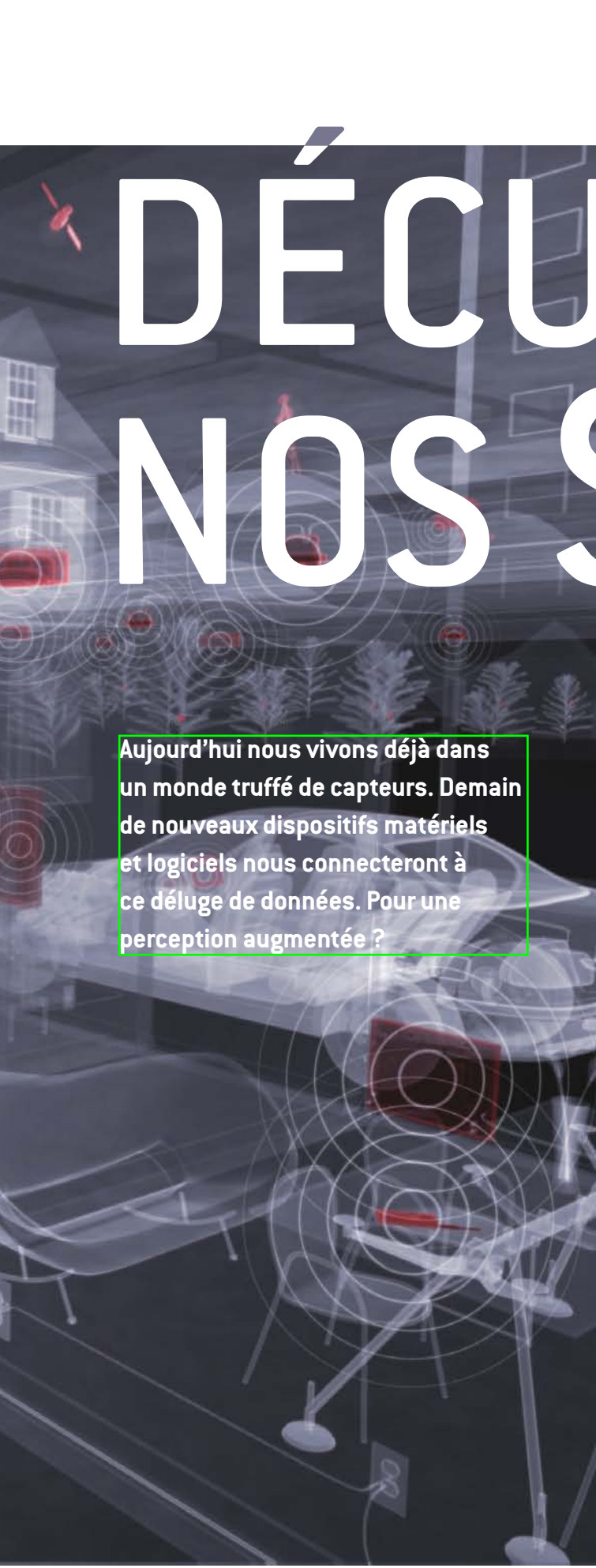
L'ESSENTIEL

■ Des « navigateurs sur réseaux de capteurs », qui nous permettront d'intégrer les données des capteurs omniprésents dans le monde moderne, sont en cours de développement.

■ Grâce à eux, il sera possible de se transporter virtuellement dans des environnements lointains.

■ Nous pourrions même percevoir directement les informations grâce à des prothèses sensorielles.

■ Il faudra cependant prendre des précautions pour protéger la vie privée.



DÉCOUPLER NOS SENS

Gershon Dublon et Joseph Paradiso

Aujourd'hui nous vivons déjà dans un monde truffé de capteurs. Demain de nouveaux dispositifs matériels et logiciels nous connecteront à ce déluge de données. Pour une perception augmentée ?

Essayez de compter les capteurs électroniques qui vous entourent. Il y a des caméras et des microphones dans votre ordinateur. Des dispositifs de géolocalisation et des gyroscopes dans votre téléphone dernier cri. Des accéléromètres dans votre *fitness tracker* (un appareil portable qui enregistre le rythme cardiaque, la distance parcourue, les calories perdues, etc.). Si vous travaillez ou vivez dans un immeuble moderne, vous êtes entouré de capteurs mesurant le mouvement, la température et l'humidité.

Les capteurs, toujours plus petits, meilleur marché et plus puissants, envahissent notre quotidien. Il y a quelques décennies, les gyroscopes et les accéléromètres étaient chers et encombrants, et de ce fait limités à des applications telles que le guidage de missiles ou de vaisseaux spatiaux ; on en trouve maintenant dans tous les téléphones mobiles récents. En outre, la connectivité du réseau a explosé. Grâce aux progrès réalisés dans la conception des dispositifs microélectroniques, dans la gestion de l'énergie et dans l'exploitation des ondes électromagnétiques, un circuit intégré coûtant moins d'un euro peut relier un système de capteurs à un réseau de communications sans fil de faible consommation.

La quantité d'information créée par la constellation de capteurs installés à travers le monde est prodigieuse, presque inconcevable. Mais la plupart des données nous sont invisibles. Elles sont en général cloisonnées, accessibles à un seul appareil et pour une application spécifique, telle que le contrôle d'un thermostat ou le suivi du nombre de pas effectués dans la journée.

Éliminer ces cloisonnements bouleverserait l'informatique et les communications. Quand des protocoles autoriseront un échange massif de données (plusieurs candidats existent déjà), n'importe quelle application pourra accéder aux capteurs d'un dispositif quelconque.

Illustration : G. Dublon

Nous entrerons alors dans l'ère de l'informatique ubiquitaire, annoncée de longue date – l'informaticien Mark Weiser l'imaginait déjà dans les pages de cette revue il y a un quart de siècle, en 1991.

Nous doutons que la transition soit progressive. Elle devrait plutôt être déclenchée par une innovation majeure, similaire à l'invention du Web. Les prémices du changement sont perceptibles dans des applications pour téléphone mobile telles que *Google Maps* et *Twitter*, autour desquelles ont émergé d'énormes entreprises. Mais le déclic ne se produira que lorsque les données des capteurs seront rendues librement accessibles entre appareils. La prochaine vague d'entreprises technologiques valant des milliards d'euros sera construite autour des agrégateurs de contexte, une nouvelle génération d'applications capables d'assembler et d'exploiter les informations des capteurs qui nous entourent.

Prédire la façon dont l'informatique ubiquitaire et les données des capteurs influenceront sur la vie quotidienne est aussi difficile que l'aurait été, il y a 30 ans, l'anticipation de l'impact d'Internet. Les idées du théoricien des communications Marshall McLuhan (1911-1980), développées dans les années 1960, peuvent servir de guide. Selon lui, les médias électroniques, principalement la télévision, sont devenus une extension du système nerveux humain. Maintenant que les capteurs sont partout et que leurs données peuvent être greffées à la perception humaine par divers moyens, où s'arrêtent nos sens ? Que signifiera le fait d'être présent quelque part quand la perception pourra s'étendre librement à travers le temps et l'espace ?

Visualiser les données des capteurs

Pour percevoir le monde, nous utilisons tous nos sens, tandis que nous n'accédons à l'essentiel des données numériques que par l'intermédiaire des minuscules écrans bidimensionnels des appareils électroniques. Les informations qui nous parviennent passent donc par un goulot d'étranglement. Il serait pourtant intéressant d'exploiter cette manne de données, dont la quantité explose. C'est pourquoi notre équipe au MIT (Institut de technologie du Massachusetts) travaille depuis des années sur des moyens de traduire les données des réseaux de capteurs dans le langage de la perception humaine.

LES AUTEURS



Gershon DUBLON est doctorant au *Media Lab* (Laboratoire des médias) du MIT (Institut de technologie du Massachusetts, aux États-Unis), où il développe de nouveaux outils pour interagir avec les capteurs.

Joseph PARADISO est maître de conférence au *Media Lab*. Il y dirige le Groupe des environnements réactifs.

EN VIDÉO



Conférence de Gershon Dublon : www.youtube.com/watch?v=f2j5cLayLgM#t=541

De même que les premiers navigateurs du Web, tel *Netscape*, ont rendu accessible la masse d'information présente sur Internet, leurs successeurs donneront du sens aux flots de données issues des capteurs. Les meilleurs outils actuels pour développer ces nouveaux navigateurs sont les moteurs de jeu vidéo – des logiciels qui permettent à des millions de joueurs d'interagir dans des environnements tridimensionnels crédibles et en perpétuel changement.

Avec le moteur de jeu *Unity 3D*, nous avons développé une application nommée *DoppelLab*. Elle collecte les données recueillies par des capteurs placés dans un environnement particulier, tel un bâtiment, et restitue l'information sous forme graphique, en la superposant à une image virtuelle du bâtiment sur un écran d'ordinateur (voir l'encadré page ci-contre). Nous l'avons installée dans notre laboratoire. Ainsi, un utilisateur peut voir en temps réel la température de chaque pièce, le nombre de personnes qui marchent dans une certaine zone, ou même la localisation de la balle sur notre table de ping-pong intelligente.

Un environnement sonore virtuel

DoppelLab ne fait pas que visualiser des données. Il recueille aussi les sons captés par des microphones éparpillés dans le bâtiment et s'en sert pour créer un environnement sonore virtuel. Afin de respecter la vie privée, les flux audio sont brouillés avant d'être transmis. Cela rend les paroles incompréhensibles tout en préservant l'ambiance du lieu et les caractéristiques vocales de ses occupants. Avec *DoppelLab*, il est aussi possible de mettre en scène des données enregistrées dans le passé. On peut observer une scène sous différents angles ou examiner en accéléré les données pour découvrir les cycles cachés de la vie d'un bâtiment.

Les navigateurs sur réseau de capteurs tels que *DoppelLab* ont des applications commerciales immédiates, telle l'instauration de panneaux de contrôle virtuels pour de grands bâtiments. Auparavant, le gardien confronté à un problème de chauffage devait passer au crible les feuilles de données renvoyées par de multiples capteurs de température, afin de repérer les valeurs anormales et déterminer l'origine de la défaillance. Avec *DoppelLab*, cette même personne peut voir simultanément la température actuelle et la

température souhaitée pour chaque pièce, et vite repérer des problèmes touchant plusieurs pièces ou plusieurs étages. De plus, les architectes, les gestionnaires et les occupants du bâtiment ont accès aux données traduisant l'utilisation de l'infrastructure. Où les gens se rassemblent-ils et quand? Quels effets les éventuels aménagements apportés au bâtiment ont-ils sur la façon dont les gens y interagissent et y travaillent?

Outre ces applications, les navigateurs sur réseaux de capteurs permettront de se transporter virtuellement dans des endroits lointains et d'y « être » en temps réel. Nous travaillons sur un projet nommé *Living Observatory at Tidmarsh Farms* (Observatoire vivant des Tidmarsh Farms), qui vise à immerger virtuellement des visiteurs dans un environnement naturel changeant.

Depuis 2010, dans le Sud du Massachusetts, un groupe d'organisations environnementales publiques et privées convertit 250 hectares de tourbières, les Tidmarsh Farms, en une zone humide côtière protégée. Notre collègue Glorianna Davenport en est copropriétaire. Ayant travaillé sur l'avenir du documentaire au laboratoire, elle est fascinée par l'idée d'un environnement riche en capteurs produisant son propre « documentaire ». Avec son aide, nous développons des réseaux de capteurs qui renseignent sur les processus écologiques et permettent aux personnes intéressées de s'immerger dans les données produites. Nous avons commencé à installer des centaines de capteurs sans fil mesurant la température, l'humidité, la luminosité, les mouvements, les propriétés du vent, les sons, les flux de

sève dans les arbres et les concentrations de divers composés chimiques.

Économes en énergie, ces capteurs fonctionneront pendant des années avec leurs piles actuelles. Certains seront équipés de panneaux solaires, qui apporteront assez d'énergie pour transmettre des sons : le bruit de la brise, des oiseaux qui chantent à proximité, des gouttes de pluie qui tombent sur les feuilles voisines... Des collègues de l'Université du Massachusetts, à Amherst, équipent Tidmarsh de capteurs perfectionnés, notamment des sondes de température submersibles en fibre optique ou des instruments qui mesurent la quantité d'oxygène dissous dans l'eau. Toutes ces informations seront transmises à une base de données stockée sur nos serveurs et que les utilisateurs pourront explorer *via* diverses applications.

NAVIGUER DANS LES DONNÉES DES CAPTEURS

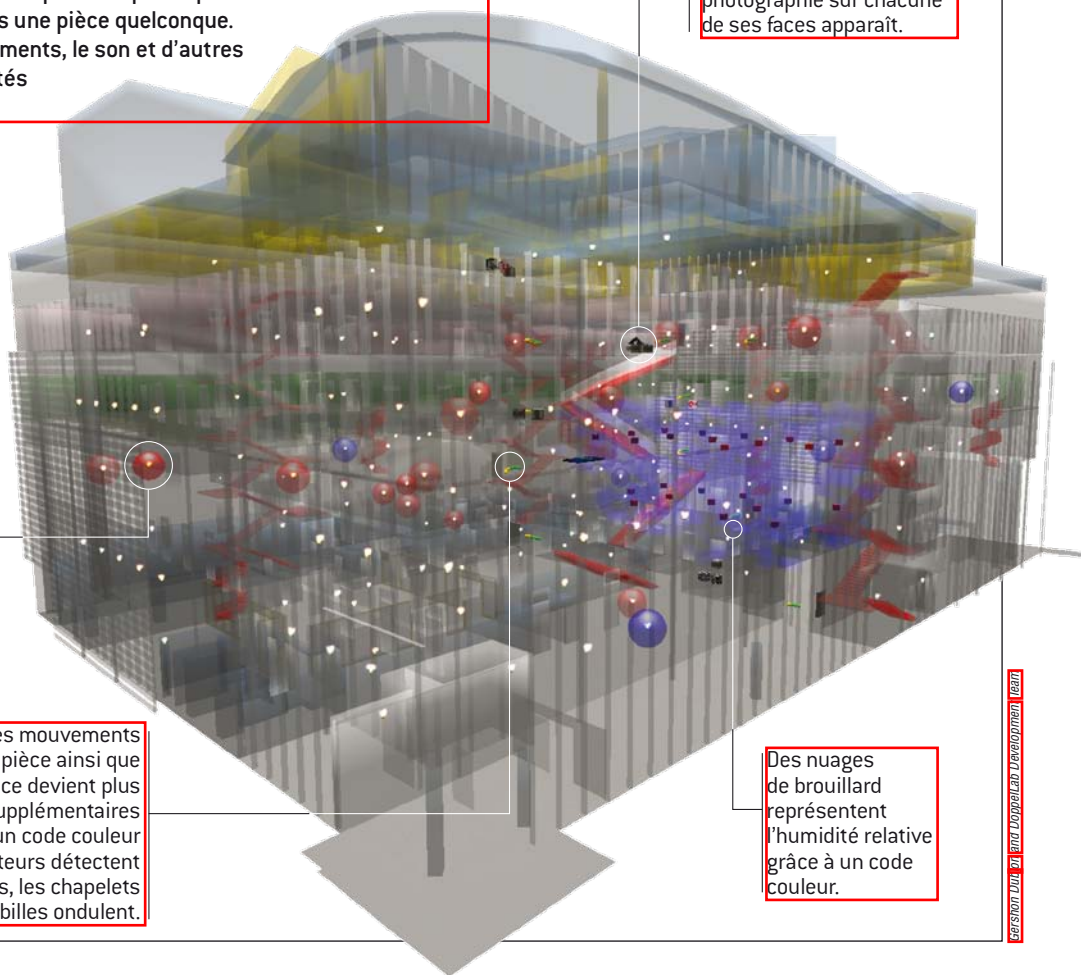
Le logiciel de navigation conçu par les auteurs, nommé *DoppelLab*, recueille les données de capteurs répartis dans tout le *Media Lab* du MIT et les met en scène dans un modèle translucide du bâtiment. Le navigateur s'actualise automatiquement, de sorte que les utilisateurs peuvent se connecter à tout moment depuis n'importe quel ordinateur et voir ce qui se passe dans une pièce quelconque. La température, les mouvements, le son et d'autres paramètres sont représentés au moyen d'icônes.

Si une personne munie d'une radio-étiquette RFID s'approche d'un groupe de détecteurs dans un espace public, un cube portant sa photographie sur chacune de ses faces apparaît.

Dans chaque bureau, une icône représente la température de la pièce : plus elle est bleue, plus la température est froide, et plus elle est rouge, plus il fait chaud. Si la température diffère de celle réglée au thermostat, une sphère pulsante apparaît autour de la flamme correspondante. Le rythme des pulsations augmente avec l'écart entre les températures mesurée et souhaitée.

Des billes représentent les mouvements des personnes à travers la pièce ainsi que le niveau sonore. Si une pièce devient plus bruyante, des billes supplémentaires apparaissent selon un code couleur déterminé. Si les capteurs détectent des mouvements, les chapelets de billes ondulent.

Des nuages de brouillard représentent l'humidité relative grâce à un code couleur.



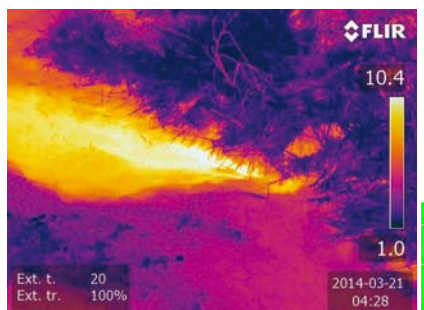
Certaines de ces applications aideront les écologues à visionner les données environnementales recueillies. D'autres seront destinées au grand public. Par exemple, nous développons un navigateur du type de *DoppelLab* qui permettra de visiter virtuellement Tidmarsh à partir de n'importe quel ordinateur disposant d'une connexion Internet. Le visiteur se promènera dans une image numérique des tourbières, remplie d'arbres et de végétation virtuels. Le moteur de jeu ajoutera les sons du réseau de microphones et les données recueillies par les capteurs. Les sons subiront un traitement de fondu enchaîné, en fonction de la position virtuelle de l'utilisateur ; vous pourrez vous élever au-dessus de la zone et entendre tout ce qui s'y passe, vous approcher d'un petit secteur, ou nager sous l'eau et écouter les bruits collectés par les hydrophones. Un vent numérique, fidèle aux données recueillies en temps réel sur le site, soufflera dans les arbres virtuels.

L'Observatoire vivant est plus un projet de démonstration qu'un prototype commercial, mais les applications sont faciles à imaginer. Les agriculteurs pourraient utiliser un tel système pour surveiller des terrains quadrillés de capteurs, afin de suivre l'évolution de l'humidité, les concentrations d'engrais et de pesticides, ou la présence d'animaux dans leurs cultures. Des équipes de secours pourraient surveiller la progression des tempêtes et des inondations dans une ville pendant qu'elles portent assistance aux habitants. Cette technologie aurait aussi de multiples applications dans la vie quotidienne : elle permettrait par exemple de vérifier l'ambiance d'un restaurant (est-il bondé et bruyant ?) avant de s'y rendre.

Une présence virtuelle

Il nous arrive déjà d'utiliser *DoppelLab* pour nous connecter à notre laboratoire quand nous sommes en déplacement. En percevant le bourdonnement et l'activité qui y règnent, nous nous sentons un peu plus proches de chez nous. De même, les voyageurs pourraient s'immerger dans une projection virtuelle de leur domicile pour passer du temps avec leur famille quand ils en sont éloignés.

La prochaine vague de l'informatique sera probablement dominée par les dispositifs portables. Ce sera l'occasion d'inventer des façons plus naturelles d'interagir avec les données des capteurs. Les appareils



LES DONNÉES DE CAMÉRAS INFRAROUGES, placées dans la tourbière des Tidmarsh Farms, sont transmises à des observateurs distants. Ceux-ci peuvent alors repérer de l'eau souterraine (en jaune) qui se mélange à de l'eau de surface, plus froide. La température de cette dernière évolue comme celle de l'air, tandis que celle de l'eau souterraine reste stable toute l'année.

BIBLIOGRAPHIE

J. Lifton et al., *Metaphor and manifestation : Cross reality with ubiquitous sensor/actuator networks*, IEEE Pervasive Computing, vol. 8(3), pp. 24-33, 2009.

V. Vinge, *Rainbow's End*, Tor Books, 2006.

M. Weiser, *Les réseaux informatiques de l'an 2000*, Pour la Science, n° 169, 1991.

électroniques portables pourraient *de facto* devenir des prothèses sensorielles.

Les chercheurs développent depuis longtemps des dispositifs de substitution sensorielle, qui visent à compenser un handicap perceptif en réorientant les signaux électriques émis par des capteurs placés sur le corps vers les sens opérationnels du patient. Par exemple, un dispositif pour non-voyants comprend une caméra placée sur des lunettes et une plaque d'électrodes qui stimule la peau d'une façon caractéristique de l'image enregistrée. Des travaux récents suggèrent que grâce à la neuroplasticité (la capacité du cerveau à s'adapter à de nouveaux stimulus), des stimulus artificiels transmis aux canaux sensoriels pourraient être intégrés de la même façon que des perceptions naturelles. Mais il reste un fossé entre les données de réseaux de capteurs et l'expérience sensorielle humaine.

Des prothèses dirigées par l'attention

Selon nous, l'une des clefs pour débloquer le potentiel des prothèses sensorielles sera de mieux s'accorder avec l'état attentionnel de la personne qui les porte. Aujourd'hui, les dispositifs portables les plus évolués, tels que les *Google Glass*, font office d'assistants extérieurs qui suggèrent à leur propriétaire des informations pertinentes selon le contexte (ils lui recommandent par exemple un certain film lorsqu'il passe devant un cinéma). Mais ces suggestions ont souvent un effet perturbateur, voire agaçant, ce qui n'est pas le cas avec nos systèmes sensoriels. Ces derniers permettent de prêter attention ou pas aux stimulus, et ce de façon dynamique ; on peut se mettre à l'écoute d'un sens quand on l'estime nécessaire, ou choisir de rester concentré sur ses activités.

Nous cherchons alors à développer des dispositifs qui intègrent cette capacité du cerveau à se focaliser sur certaines tâches tout en maintenant une connexion « préattentive » à l'environnement. Notre première expérience déterminera si un dispositif portable peut trouver, parmi un ensemble de sources sonores, laquelle l'utilisateur écoute. Nous aimerions permettre à ce dernier de se mettre à l'écoute des sons retransmis en direct par les microphones et les hydrophones de Tidmarsh de la même façon que s'il s'agissait de sources naturelles. Imaginez que vous vous concentriez sur une île éloignée au milieu d'un étang, et

Une plate-forme expérimentale en France : FIT-IoT LAB

Les problématiques de recherche autour des réseaux de capteurs sont multiples. Elles vont de la miniaturisation et la biodégradabilité des composants aux protocoles de communication, en passant par l'extinction périodique des capteurs pour économiser leur énergie.

Ces recherches ont produit des résultats prometteurs par des simulations, mais elles souffrent d'un manque d'expérimentations. Et si certaines expérimentations sont menées, c'est en général à petite échelle, avec des réseaux composés d'une dizaine de nœuds au plus (car chaque nœud, qui comporte plusieurs capteurs, doit être configuré individuellement, une opération fastidieuse).

C'est pourquoi la plate-forme FIT-IoT LAB a été créée. C'est

l'une des plates-formes de l'« équipement d'excellence » FIT (pour *Future Internet of Things*, futur Internet des objets) régi par l'Université Pierre et Marie Curie, Inria, l'Université de Strasbourg, l'Institut Mines Telecom et le CNRS. FIT fédère plusieurs plates-formes d'expérimentation dans le domaine de l'Internet des objets, ce qui permet à des utilisateurs académiques et industriels de réaliser des expériences.

FIT-IoT LAB (pour *Internet of Things Laboratory*) donne accès

à plus de 2700 capteurs sans fil tels que ceux déployés au MIT ou à Tidmarsh et répartis sur plusieurs sites (Lille, Grenoble, Paris, Strasbourg et Rennes). Plus de 200 d'entre eux sont mobiles, portés soit par des trains électriques miniatures, soit par des robots de divers types. On peut ainsi expérimenter des modèles de mobilité très différents.

FIT-IoT LAB propose à ses utilisateurs des tutoriels et des outils permettant d'estimer finement les consommations énergétiques des capteurs. Lorsqu'un utilisateur souhaite utiliser la plate-forme, il se connecte à distance avec un navigateur Web classique. De là, il réserve les nœuds dont il a besoin (caractéristiques,

nombre, topologie du réseau), configure les éléments qu'il souhaite récupérer au travers de son expérimentation et charge son programme informatique. Lorsque les ressources sont disponibles, le programme est téléchargé automatiquement sur les capteurs choisis et l'expérimentation est lancée. S'il le souhaite, l'utilisateur peut également interagir avec son réseau de capteurs en temps réel.

De par ces caractéristiques, FIT-IoT LAB est une plate-forme unique au monde. Elle compte aujourd'hui plus de 300 utilisateurs (dont une dizaine d'industriels) de plus de 40 pays.

**- Nathalie Mitton
et David Simplot-Ryl
Inria Lille-Nord Europe**

que vous commenciez peu à peu à entendre les sons qui en proviennent, comme si vos oreilles étaient capables d'augmenter leur portée. Ou que vous marchiez le long d'un ruisseau et que vous perceviez les bruits produits sous l'eau. Ou encore, que vous leviez le regard et que vous entendiez le chant d'un oiseau en haut d'un arbre. Cette façon de traiter les informations numériques marquerait le début d'une connexion fluide entre nos systèmes sensoriels et les données des réseaux de capteurs. Dans le futur, des implants sensoriels ou neuraux assureront probablement cette connexion.

Rêve ou cauchemar ?

Pour de nombreuses personnes, y compris nous-mêmes, le monde que nous venons de décrire a un côté inquiétant. Cette forme de présence virtuelle changerait notre relation au monde et aux autres. Plus préoccupant, l'informatique ubiquitaire risque d'empiéter sur la vie privée. Mais nous pensons que des garde-fous peuvent être érigés de plusieurs façons.

Il y a une dizaine d'années, Mat Laitowitz, qui travaillait dans notre laboratoire, y a déployé 40 caméras et capteurs. Il a intégré un gros interrupteur à chaque appareil, afin de pouvoir le désactiver faci-

lement. Aujourd'hui, trop de caméras, de microphones et d'autres capteurs sont éparpillés un peu partout pour qu'un individu puisse les éteindre un par un, quand bien même ils seraient équipés d'un interrupteur. Nous devons trouver d'autres solutions.

L'une des approches consiste à concevoir des capteurs qui s'adaptent au contexte et aux préférences de la personne. C'est ce qu'a réalisé Nan-Wei Gong quand elle faisait partie de notre groupe de recherche, il y a quelques années. Elle a construit un porte-clés qui transmettait par les ondes aux capteurs proches les préférences de son utilisateur en matière de vie privée. Son dispositif était doté d'un gros bouton «Non» qui, lorsqu'il était pressé, empêchait tous les capteurs à proximité de transmettre leurs données pendant un certain temps ; l'utilisateur avait alors la garantie d'un instant d'intimité.

Quelles que soient les solutions retenues, les capteurs entourant une personne devront pouvoir honorer de telles requêtes. La conception des protocoles nécessaires présente des défis techniques aussi bien que légaux. Des chercheurs du monde entier étudient déjà diverses approches pour les surmonter. Par exemple, la loi pourrait donner à chacun la propriété des données créées dans son voisinage ; on

serait alors libre de crypter ces données ou de les empêcher de rejoindre le réseau.

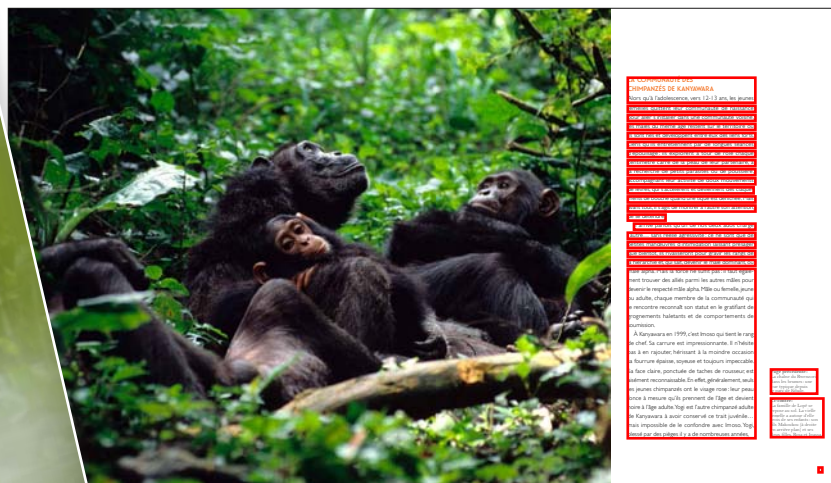
L'un des objectifs du *DoppelLab* et de l'Observatoire vivant est d'analyser dans un espace sécurisé comment se manifestent en pratique ces difficultés liées au respect de la vie privée. À mesure que les dangers de la technologie se révèlent, nous essayons de trouver des solutions. Comme l'illustrent les révélations récentes de l'ancien employé de la NSA Edward Snowden, la transparence est essentielle et les menaces sur la vie privée doivent être prises en compte dans la législation, après un débat public. À défaut, nous pensons que la meilleure protection contre les atteintes du système à la vie privée serait de développer les matériels et logiciels nécessaires aux réseaux de capteurs en *open source*, c'est-à-dire en mettant les informations sur leur fonctionnement à la disposition de chacun.

Pendant ce temps, nous commencerons à vivre de nouvelles expériences dans un monde de capteurs. Les perspectives nous enthousiasment. Selon nous, il est possible de développer des outils qui s'incorporent à notre environnement et à nos corps. Grâce à eux, nous n'aurons plus le nez collé à nos écrans de téléphone et nous serons plus que jamais présents dans le monde qui nous entoure. ■

La sélection de livres

■ POUR LA SCIENCE pour Noël

Sciences et images sont à l'honneur pour cette sélection spéciale Noël ! Découvrez la science comme vous ne l'avez jamais vue à travers de splendides photographies d'animaux, d'images du monde microscopique incroyables ou encore d'illustrations mathématiques uniques !

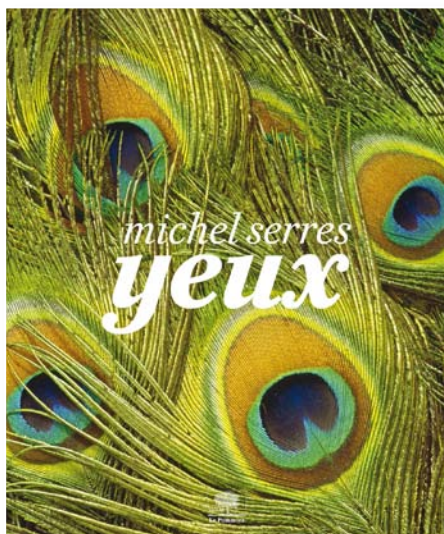


Les chimpanzés des Monts de la Lune Sabrina Krief et Jean-Michel Krief, préface de Nicolas Hulot

Réf. 70118308

Imaginez-vous au cœur d'une forêt tropicale. À moins de dix mètres, des chimpanzés sauvages. Vous entendez leurs rires, leurs parties de jeu endiablées. Vous les voyez utiliser des outils, prendre soin de leurs petits, se soigner à l'aide de plantes. Voilà ce que vivent depuis plus de quinze ans Sabrina Krief, chercheuse au Muséum national d'Histoire naturelle, et Jean-Michel Krief, photographe. Ce beau livre est aussi le récit d'une aventure scientifique exceptionnelle.

Editions Belin 2014 - 264 pages - 30 € - 978-2-7011-8308-4

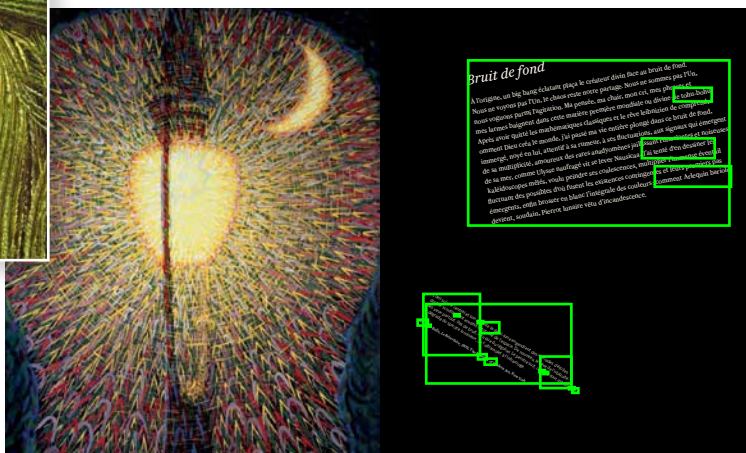


Yeux Michel Serres

Réf. 74650779

Comment voit-on ? Qu'est-ce que voir ? Être vu ? Quelles performances de vision peut-on rencontrer dans la nature ? Et jusqu'où l'homme pourra-t-il « voir » le monde ? Dans ce livre magnifique, Michel Serres explore, à la façon de variations, les capacités des yeux, de tous les yeux.

Editions Le Pommier 2014 - 216 pages - 39 € - 978-2-7465-0779-1



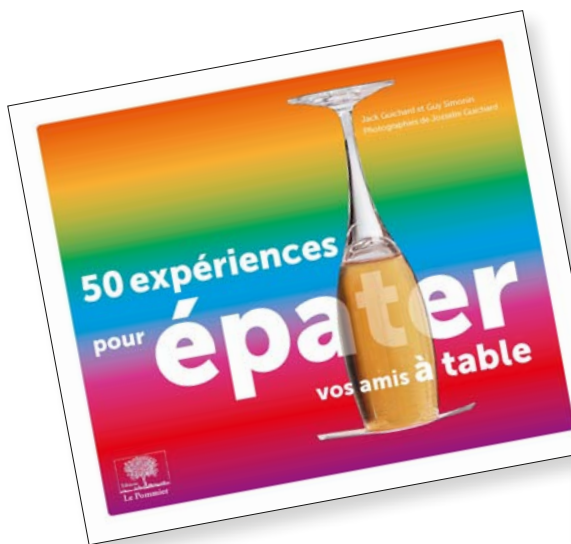
En partenariat avec les éditeurs

Belin:
ÉDITEUR INDÉPENDANT
DEPUIS 1777

Le Pommier

Pour commander ces ouvrages www.pourlascience.fr/librairie

ou en renvoyant le bon de commande ci-contre.



50 expériences pour épater vos amis à table

Jack Guichard
et Guy Simonin

Réf. 74650544

Retournez votre verre de vin sans en perdre une goutte, transformez l'eau en vin, créez un nuage dans une bouteille, mettez une olive en lévitation ! Des expériences très faciles à réaliser et enrichies d'une explication simple et compréhensible des phénomènes scientifiques en jeu.

Editions Le Pommier 2013
168 pages - 18,90 €
978-2-7465-0544-5



Micromonde

François Michel et Hervé Conge

Réf. 70117566

Partez à la découverte de l'architecture secrète du monde vivant et du monde minéral. Offrez-vous un voyage dans l'intimité de la nature, accompagné de commentaires joyeux.

Editions Belin 2014 - 192 pages
23 € - 978-2-7011-7566-9

BON DE COMMANDE

À retourner accompagné de votre règlement à :
Groupe Pour la Science • 628 avenue du Grain d'Or • 41350 Vineuil

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

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

J'indique mes coordonnées :

Nom : _____
Prénom : _____
Adresse : _____

C.P. : _____ Ville : _____
Pays : _____ Tél. : _____
E-mail : _____

Je choisis mon mode de règlement :

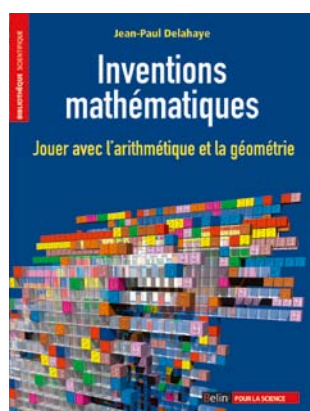
☐ par chèque à l'ordre de *Pour la Science*
☐ par carte bancaire

Número : _____
Date d'expiration : _____
Cryptogramme : _____

Signature obligatoire

Belin
SCIENCE (ÉDITEUR INDÉPENDANT DEPUIS 1977)
Le Pommier

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



Inventions mathématiques

Jean-Paul Delahaye

Réf. 84245128

Dans ce livre, vous trouverez des figures paradoxales, des jeux classiques comme le Tangram et le cube de Rubik, des problèmes du quotidien tels le découpage d'une pizza ou l'accrochage d'un tableau, etc.

Éditions Belin-Pour la Science 2014
192 pages - 25 € - ISBN 978-2-8424-5128-8

Tous ces livres sont également disponibles en librairie.

DPL446 Offre valable jusqu'au 31/12/2014 dans la limite des stocks disponibles

HISTOIRE DES SCIENCES

Madame Picardet, traductrice scientifique ou cosmétique des Lumières ?

Au XVIII^e siècle à Dijon, une femme acquit une réputation internationale en traduisant nombre d'écrits de chimistes et minéralogistes européens. Bien que son nécrologue ait crié à l'imposture, sa réputation n'était pas usurpée.

Patrice BRET

Le 4 octobre 1820, la Baronne Guyton de Morveau, née Claudine Poulet (en 1735), meurt en son hôtel de la rue de Lille à Paris, dans sa 86^e année. Seul le *Journal de Dijon* et de la Côte-d'Or rend un dernier hommage à celle qui, sous le nom de son premier mari, Picardet, a contribué à animer la vie intellectuelle de la capitale bourguignonne sous le règne de Louis XVI en réunissant savants et amateurs de science, et qui a acquis une réputation internationale en traduisant de quatre langues une vingtaine de chimistes et minéralogistes européens, dont quelques-uns des principaux du moment : le Suédois Carl Wilhelm Scheele, l'Irlandais Richard Kirwan et le Saxon Abraham Gottlob Werner.

Nécrologie bien inhabituelle, pourtant, celle que lui consacre le journal dijonnais... Plutôt que de faire l'éloge de la défunte, le rédacteur Claude-Nicolas Amanton nie la réalité de son œuvre :

Il ne faut pas croire, toutefois, sur la foi de ses traductions, qu'elle ait jamais outragé les grâces au point de s'enfoncer dans l'étude des langues tudesques et suédoises. Voici le secret de ces traductions ; il forme une anecdote peu connue, de la vérité de laquelle nous avons été, dans le temps, à portée de nous assurer.

Pour lui, le mérite réel revient à deux hommes, l'obscur avocat Jacques Magnien pour la partie linguistique, et le magistrat,

encyclopédiste et chimiste Louis-Bernard Guyton de Morveau (1737-1816) pour la partie scientifique :

M. de Morveau, familier avec la science et ses expressions techniques, avait bientôt, à l'aide de la traduction nécessairement informée d'un homme qui ne savait pas un mot de chimie, saisi le sens de l'original ; il le devinait pour ainsi dire, et le rétablissait quand il avait échappé au traducteur ; la traduction était ainsi livrée à Madame Picardet, qui mettait la dernière main à l'œuvre, en colorant de son style les ébauches de ses devanciers.

Dans ce scénario, la future femme de Guyton de Morveau n'aurait donc eu qu'un rôle cosmétique, « la part sans doute la plus aimable » de l'opération, celle de polir le texte. Amanton entend dénoncer un maquillage de la réalité, une imposture collective qu'auraient montée les collaborateurs de Mme Picardet afin « d'ajouter ainsi à sa réputation de femme d'une beauté remarquable, de femme d'esprit, celle de femme savante ».

L'imposture aurait été bien productive et durable : plus de 1000 pages publiées entre 1774 et 1797, dont un livre traduit de l'allemand et une cinquantaine d'articles dans des journaux et ouvrages savants : 26 traduits du suédois, 15 de l'allemand, 8 de l'anglais et 2 de l'italien. Elle aurait aussi été bien orches-

trée, et ce dès la première publication dans le *Journal de physique*, ainsi introduite :

La frivolité perd peu à peu son empire ; et c'est à l'étude de la physique et de l'histoire naturelle qu'on est redevable de cette révolution. L'exemple de Madame de P... prouve que le beau sexe sait, quand il veut, se livrer à des occupations aussi utiles et intéressantes. La traduction que nous offrons à nos lecteurs, présente une femme éclairée, un esprit juste, et une plume aussi concise qu'élégante.

Enfin, elle aurait été habilement menée avec la complicité ou la candeur de quelques-uns des principaux savants européens. Ainsi,

Imposture collective ou misogynie d'un journaliste ?

Lorsqu'en 1785, Mme Picardet publie à Dijon, anonymement, deux volumes de *Mémoires de chimie* de Scheele, réunissant 27 textes traduits du suédois et de l'allemand, l'astronome Jérôme Lalande dévoile l'identité de la traductrice dans sa recension de l'ouvrage pour le *Journal des savants*. Cela permet à Mme Picardet de sortir de l'anonymat d'une initiale pour signer ses nouvelles traductions de son nom marital, et à Félix Vicq d'Azyr, secrétaire perpétuel de la Société royale

de médecine, de l'associer à son éloge du savant suédois, décédé entre-temps :

Encouragée par M. de Morveau, l'un des savants les plus distingués de ce siècle, Madame Picardet, épouse d'un magistrat de Dijon, résolut d'apprendre les langues allemande et suédoise uniquement pour transmettre dans la nôtre les découvertes du chimiste de Köping ; et son entreprise eut le plus grand succès. Cet acte de dévouement

et de courage suppose dans le traducteur de M. Scheele, non le bel esprit qu'on loue trop, mais le bon esprit qu'on ne loue point assez, et qui se montrerait sans doute plus souvent s'il était apprécié ce qu'il vaut.

Alors ? Imposture collective ou misogynie d'un journaliste ? Que Guyton de Morveau souhaite honorer sa principale collaboratrice et amie chère – que la rumeur tient pour sa maîtresse – en lui attribuant le mérite de la tra-

duction reste plausible. Le chimiste Antoine-Laurent Lavoisier en fait autant : le manuscrit d'une traduction de sa femme atteste qu'il l'a largement amendé et qu'il a même rédigé les notes qu'il lui attribue par la mention autographe « Note du traducteur ». Bien que Morveau signe généralement les notes des traductions de Mme Picardet, son désir de mettre celle-ci en avant est tout aussi évident. Pourtant, l'étude du dossier prouve que c'est bien d'une forme de misogynie, consciente ou non, que relève la nécrologie rédigée par Amanton. Pour lui, les compétences d'une femme semblent devoir rester confinées dans la sphère de l'« aimable », dans l'écriture comme au salon – jugement qu'il assaisonne même d'une dose de corporatisme en valorisant la part de Magnien, avocat en parlement comme lui, duquel il tient probablement l'« anecdote ».

Des relevés météo pour l'Académie de Dijon

Amanton est lui-même victime d'une sorte d'imposture institutionnelle : il attribue au mari, Claude Picardet, les relevés barométriques que celui-ci a publiés dans les *Nouveaux mémoires de l'Académie de Dijon*. Ce dernier précise pourtant que « lorsque ses affaires ne lui permettent pas de s'en acquitter personnellement, il est remplacé par Mad^e Picardet, dont l'application et le zèle pour les progrès des sciences sont connus par les traductions qu'elle a données au public ». Il apparaît même qu'elle assure seule la tâche.

En juillet 1785, en effet, à la demande de l'Abbé Bertrand, professeur de physique au collège de Dijon, Lavoisier offre à l'Académie de Dijon un baromètre que le chancelier de la compagnie, Morveau, confie à son amie proche pour relever la pression et la température trois fois par jour. En 1787, le couple Lavoisier se rend chez elle et compare les données avec celles de leur instrument de voyage. Deux semaines plus tard, en envoyant à Lavoisier les relevés du mois précédent, Mme Picardet écrit : « Je suis si flattée d'être digne de faire une observation qui m'a procuré l'avantage inestimable de recevoir votre visite et celle de Madame Lavoisier, que je ne puis vous en exprimer assez ma sensibilité. Cette idée



1. SUR CE TABLEAU ANONYME
du XIX^e siècle, inspiré du portrait du couple Lavoisier par Jacques-Louis David (1788), Lavoisier (*assis*) et sa femme (*à gauche*) sont représentés avec Guyton de Morveau (*à droite*), Berthollet, Fourcroy (*au centre*) et une autre femme tenant un livre, qui pourrait être Mme Picardet.

LESSERRE-EMY SCHEERMAN - INSTITUT

qui m'est toujours présente me procure un plaisir, qui est un pur garant de mon exactitude. » Aussi, en avril 1788, lorsque l'Abbé Bertrand demande à Lavoisier de récupérer l'instrument, tout en concédant qu'elle est une

« Mme Picardet est à sa place au salon, comme dans le cabinet d'étude. »

Arthur Young, 1789

« femme d'un mérite infiniment varié, et qui se prête à tous les genres d'observations », il est débouté par le chimiste :

Le baromètre, quel que soit le véritable propriétaire, est entre les mains de M^{de} Picardet qui fait des observations exactes et assidues et il me paraît difficile de le lui retirer puisque c'est de votre consentement qu'il lui a été remis. Voilà Monsieur à quoi je croirais devoir conclure sans honte la question de la propriété au fonds, propriété que je croirais être à l'Académie de Dijon.

À l'instar de professeurs d'hydrographie et correspondants de l'Académie royale des sciences de Paris, la salonnière provinciale appartient donc au réseau d'observateurs qui collectent des données dans l'espoir d'établir une science de la météorologie. Sans doute Amanton l'ignorait-il, comme il ignorait que Mme Picardet constituait sa propre collection de minéraux et fréquentait le laboratoire de l'Académie de Dijon. Mais cette ignorance témoigne de la fragilité de son information.

Il serait aisé d'opposer aux assertions d'Amanton les déclarations élogieuses sur Mme Picardet adressées à Morveau par des savants français et étrangers, mais ceux-ci ne connaissent d'elle que ses traductions officielles et ce que leur en dit le savant dijonnais. Ce sont donc moins des témoignages que des marques de civilité. D'un plus grand poids serait la correspondance de ceux qui l'ont connue, tels Buffon ou les époux Lavoisier. Mais là encore, un jeu complexe de relations sociales pourrait affaiblir les compliments. À l'astronome Lalande – qui l'appelle « notre belle académicienne » –, elle a fourni la traduction d'un texte astronomique en suédois en remerciement de sa recension pour le *Journal des savants*, que

celui-ci s'empresse à son tour de publier. Au chimiste Claude Berthollet, elle envoie des traductions pour les *Annales de chimie* et il est peu étonnant qu'il loue son travail en retour. Quant au chevalier Marsilio Landriani, chimiste italien, s'il la cite dans son rapport de mission pour l'empereur d'Allemagne en 1787, le compliment le flatte autant qu'elle :

Parmi les personnes distinguées dans les lettres à Dijon, je retiens Mad^e de Picardet, pour laquelle j'ai beaucoup de reconnaissance pour avoir traduit en français mes ouvrages chimiques et physiques. Elle mérite les remerciements de la République des lettres pour lui avoir procuré la traduction de nombreux ouvrages importants écrits en suédois, en allemand et en anglais, [...] qu'elle a élégamment traduits et enrichis de notes très intéressantes.

Néanmoins, plusieurs échanges avec d'autres personnes suggèrent que Mme Picardet comptait dans le paysage scientifique. Sans un minimum de connaissance de son sujet, Mme Picardet n'aurait pu donner le change ni au minéralogiste et chimiste espagnol Francisco Angulo, futur directeur général des mines d'Espagne, qui séjourne longuement à Dijon en 1785, travaille à ses côtés et enrichit son cabinet, ni à Augustus Granville, secrétaire de la *Geological Society* de Londres, venu en 1816 recueillir ses souvenirs et exploiter ses archives pour écrire une biographie de son mari. Et l'agronome anglais Arthur Young n'en aurait pas, non plus, laissé ce portrait dans son journal de voyage de 1789 :

Mme Picardet est à sa place au salon, comme dans le cabinet d'étude ; femme d'une simplicité charmante, elle a traduit Scheele de l'allemand et une partie des

Monsieur,

je suis si flattée d'être digne de faire une observation qui m'a procuré l'avantage inestimable de recevoir votre visite et celle de Madame Lavoisier, que je ne puis vous en exprimer avec une sensibilité, cette idée qui m'est toujours présente me procure un plaisir, qui est un pur garant de mon exactitude. voulez vous bien, Monsieur ?

2. DANS CETTE LETTRE ÉCRITE À LAVOISIER EN 1787, Claudine Picardet remercie le chimiste de lui avoir accordé une visite, avec sa femme, pour faire en commun des relevés de température et de pression avec leurs instruments respectifs. Elle appartenait au réseau formé par Lavoisier qui collectait ces données pour fonder une science de la météorologie.

ouvrages de M. Kirwan de l'anglais; c'est un trésor pour M. de Morveau, car elle peut soutenir sa conversation sur des sujets de chimie aussi bien que sur d'autres, soit agréables, soit instructifs.

Les restes de sa correspondance la montrent encore prodiguant des conseils au jeune Paul-Louis Baudot, qui hésite entre une carrière scientifique et littéraire, ou recevant de Charles de Virly, académicien en voyage à travers l'Europe savante, des nouvelles sur la science, que Morveau lit à ses confrères.

Amanton omet aussi le *Traité des caractères extérieurs des fossiles*, première tentative de Werner, professeur à Freiberg, en Allemagne, pour élaborer une classification des minéraux. La traduction de cet ouvrage avait fait reculer les spécialistes pendant 15 ans. En la donnant en 1790, Mme Picardet en revendique la propriété intellectuelle, et

expose et justifie ses choix. Afin que cette traduction constitue une véritable seconde édition, elle discute avec le minéralogiste espagnol Fausto d'Elhuyar, qui lui adresse des corrections et des additions de l'auteur, à qui il a rendu visite à Freiberg.

Pour trouver le terme approprié, avec l'aide de Morveau, elle scrute le vocabulaire des auteurs étrangers, interroge les minéralogistes bilingues, observe les minéraux et, le cas échéant, se risque au néologisme. Non seulement elle introduit Werner en France, mais elle enrichit le lexique des minéralogistes français de quelques termes (pointement, bisellement...), aussitôt adoptés en espagnol (*apuntamiento, bise-lamiento...*). Le cristallographe René-Just Haüy lui rend grâce pour avoir donné une traduction « fidèle, claire et purement écrite, qualités d'autant plus difficiles à concilier ici, que notre idiome ne paraissait pas devoir se prêter à l'analogie d'une multitude d'expressions minéralogiques employées ou même créées par l'auteur dans une langue dont le génie est si différent ». La consécration de son art de traduire est la réédition de sa version française sur les terres de Werner et avec son aval, à Dresde en 1795.

Un contexte local favorable

Si l'on rejette l'imposture dénoncée par Amanton, il reste à savoir comment une bourgeoise provinciale a appris langues et sciences et s'est risquée à publier quand tant d'autres femmes, mieux protégées par leur statut social, n'osaient franchir le pas de l'espace public. Tant Mme du Châtelet et Mme d'Arconville, ses devancières, que Mme Lavoisier, qui a suivi son modèle, sont restées dans l'anonymat. Sa personnalité nous échappe malheureusement, comme son éducation, que l'on imagine aussi soignée qu'elle pouvait être dans une bonne famille avide d'ascension sociale : notaire royal, conseiller du roi, « seigneur et propriétaire des terres et fief de Champevey », son père scelle avec éclat l'union de la jeune Claudine à un magistrat issu de la bourgeoisie marchande par des festivités inhabituelles jusque dans la nuit. Son mari et

L'AUTEUR



Patrice BRET est chercheur au Centre Alexandre Koyré (EHESS/CNRS/MNHN), à Paris,

et éditeur de la correspondance de Lavoisier à l'Académie des sciences et de celle de Guyton de Morveau.

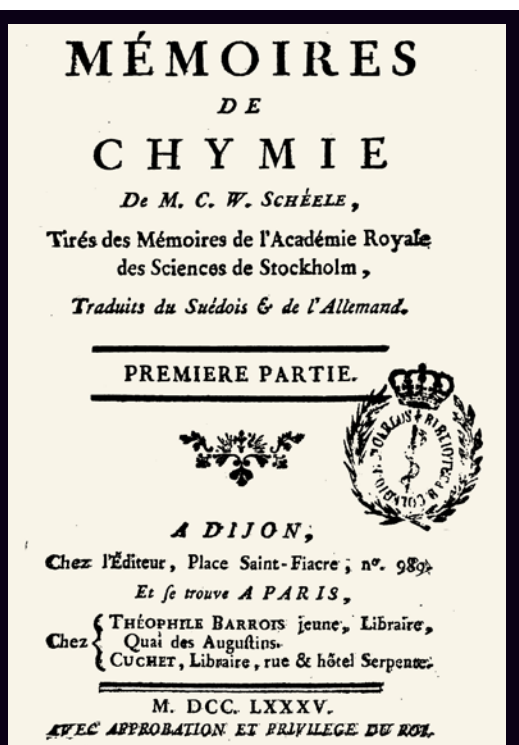
BIBLIOGRAPHIE

P. Bret, *Stratégies et influence d'une traductrice : Mme Picardet et le Traité des caractères extérieurs des fossiles d'Abraham Gottlob Werner*, dans *Femmes de sciences de l'Antiquité au XIX^e siècle* (sous la dir. de A. Gargam et P. Bret), pp. 177-208, Éd. Univ. de Dijon, 2014.

H. Krief et V. André (dir.), *Dictionnaire des femmes des Lumières*, Honoré Champion, 2014.

Y. Chevrel et al. (dir.), *Histoire des traductions en langue française. XVII^e-XVIII^e siècles*, Verdier, 2014.

P. Bret, *Les promenades littéraires de Madame Picardet. La traduction comme pratique sociale de la science au XVIII^e siècle*, dans *Traduire la science, hier et aujourd'hui* (sous la dir. de P. Duris), pp. 125-152, Maison des sciences de l'homme d'Aquitaine, 2008.



3. EN 1785, MME PICARDET publia anonymement ce recueil de traductions d'articles de Scheele, expérimentateur et analyste de talent qui découvrit « l'air du feu », l'élément chimique que Lavoisier nomma ensuite oxygène.

son beau-frère entrent à l'académie locale, le premier passant bientôt de la poésie à la direction du jardin botanique. Dans ce milieu de notables éclairés, qu'elle reçoit chez elle, elle trouve un contexte favorable.

De plus, Mme Picardet profite d'un mouvement qui transforme l'académie des sciences, arts et belles-lettres de Dijon en une institution d'éducation scientifique. Ce mouvement est soutenu par les États de Bourgogne, qui votaient le budget de la province. Après une école gratuite de dessin, les États établissent des cours de minéralogie, de chimie, de matière médicale, de botanique, d'accouchement, d'anatomie, de maladie des yeux, d'astronomie, « en sorte qu'on peut, quant aux progrès et à l'amour des Sciences, regarder la Ville de Dijon comme la rivale de la capitale », souligne le *Journal de Paris* en 1784.

Outre le secrétaire perpétuel Hugues Maret, l'âme de cette révolution académique et pédagogique est le chancelier, Guyton de Morveau. Avocat général au Parlement de Bourgogne, il apprend la chimie dans les livres et dans le laboratoire de Jean-Pierre Chardenon, à Dijon. Devenu amateur éclairé et expérimentateur hors-pair, il est appelé à refondre entièrement la chimie de l'*Encyclopédie*. Et dès 1782, il propose de revoir la nomenclature chimique, réforme qu'il achève cinq ans plus tard avec Lavoisier. Ses cours publics à l'académie sont traduits en allemand et en espagnol, et sont suivis sur place par des membres des trois ordres et des deux sexes venus de toute la Bourgogne, par des officiers d'artillerie et même par des élèves d'Edimbourg et de Madrid, que lui envoient son confrère écossais Joseph Black et le roi d'Espagne.

Ce milieu scientifique, dont Mme Picardet devient l'égérie, milite en faveur de l'accès des femmes aux sciences. Dès 1762, son beau-frère l'abbé Picardet rédige un « Essai littéraire, qui fait voir que les femmes sont aussi propres que les hommes à l'étude des sciences et à la culture des arts ». En 1776, Morveau lance même un appel pressant à l'éducation scientifique des femmes :

Il nous reste un vœu à former pour l'intérêt de la science ; c'est de voir tomber en cette province, comme dans la capitale, la barrière qu'un préjugé barbare opposait aux femmes qui, sentant le prix des connaissances, désiraient les acquérir.

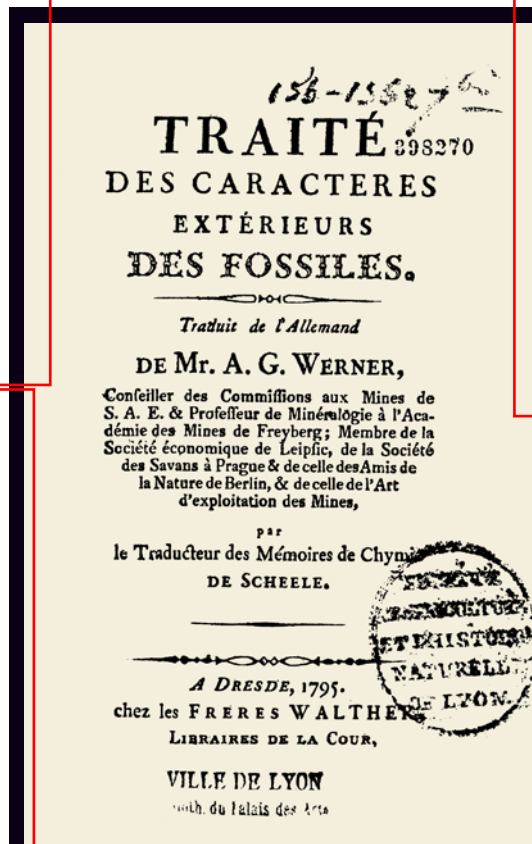
Mieux, par « l'exemple et l'empire de la mode » qu'exerce « cette belle partie du genre humain », le savant magistrat espère développer le goût des sciences chez les hommes : « Qui est-ce qui pourrait se résoudre à ignorer entièrement une langue que les Dames pourraient entendre avec intérêt ? » Nul doute que Mme Picardet n'ait suivi les cours de son ami et, lorsqu'elle publie le premier volume des *Mémoires de chimie* de Scheele, l'académie se dit « pénétrée d'admiration pour l'emploi bien rare qu'[elle] fait de ses loisirs » et lui envoie une délégation pour la féliciter.

En rédigeant sa préface à l'*Astronomie des dames* en 1786, Lalande pense à elle autant qu'aux femmes qui font des calculs astronomiques pour lui, telles que Reine Lepaute, Félicité Dupièry et Jeanne Harlay :

Je crois qu'il ne manque aux femmes que les occasions de s'instruire et de prendre de l'émulation ; on en voit assez qui se distinguent, malgré les obstacles de l'éducation et du préjugé, pour croire qu'elles ont autant d'esprit que la plupart des hommes qui acquièrent de la célébrité dans les sciences.

Mme Picardet a trouvé à Dijon les occasions de s'instruire et l'émulation nécessaires à son engagement dans les sciences, renforcé après la mort prématurée de son fils unique, tout juste reçu avocat à l'âge de 19 ans, mais aussi élève de Morveau et doué pour la peinture et la botanique.

Favoriser et valoriser le travail de Mme Picardet ne signifie pas occulter celui des autres membres du groupe : la contribution de Morveau, Magnien, Bressey et Virly à ses ouvrages est d'ailleurs dûment mentionnée le cas échéant. Écarter d'un revers de main le récit d'Amanton serait aussi une erreur, car



4. EN 1795 FUT RÉÉDITÉE EN ALLEMAGNE

La version française du *Traité des caractères extérieurs des fossiles* de Werner. Cette nouvelle publication dans son pays d'origine entérinait la valeur scientifique des ajouts apportés par sa traductrice, Mme Picardet.

ses lignes cinglantes sont révélatrices d'une certaine réalité. En véhiculant la possible frustration de Magnien, alors mort depuis près de 30 ans, son témoignage tardif reflète le fonctionnement collectif du « bureau de traduction de Dijon », où l'apprentissage concomitant de la langue et la traduction se forgeaient en atelier d'écriture.

Une facilité pour les langues

On ignore comment Mme Picardet apprit l'anglais et l'italien, langues qu'elle est la première du groupe à traduire, respectivement dès 1774 et 1782, alors que Magnien n'apparaît qu'en 1781. Morveau affirme qu'elle a « beaucoup de facilité pour les langues » et, comme lui, comme bien d'autres traducteurs de l'époque et proba-

blement comme Magnien un peu plus tôt, elle apprend le suédois « à force de collationner » les traductions sur les originaux, après avoir peut-être commencé par en polir les ébauches de ce dernier, revues par Morveau. Les traductions dijonnaises à partir du suédois sont d'abord signées Magnien (« M.M. de Dijon » ou « M. Mgn de Dijon ») ; « Mme P*** de Dijon » apparaît 11 mois plus tard.

Motivée par ses propres intérêts, poussée par ses proches et par le milieu, Mme Picardet en apprit assez, à l'aide de dictionnaires et de collaborateurs, pour traduire des textes scientifiques avec une rigueur et une élégance constatées par les critiques. Elle fut ainsi femme de sciences, autant qu'une femme pouvait l'être en France à l'époque, exerçant une influence sur son domaine comme sur la traduction et la presse scientifique naissante. ■

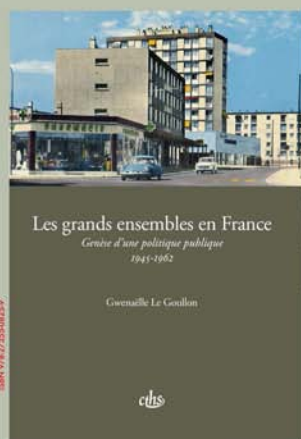
À ÉCOUTER

Le jeudi 11 décembre, de 14h à 15h, Patrice Bret participera avec Adeline Gargam, docteure en littérature française, à une émission de **La marche des sciences**, sur *France Culture*, consacrée aux femmes de sciences. Il y reviendra sur le rôle et l'influence de Mme Picardet dans la diffusion des sciences au siècle des Lumières.

www.franceculture.com

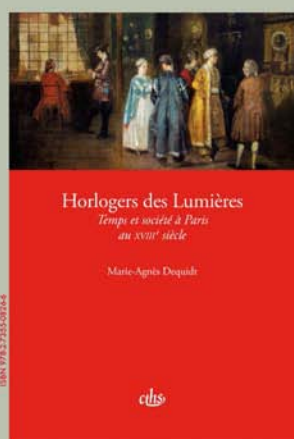
Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques

une collection complète d'instruments de travail pour la recherche en sciences humaines



Les grands ensembles en France
Gwenaëlle Le Goullon

360 pages
15 x 22 cm
br.
28 €



Horlogers des Lumières
Marie-Agnès Dequidt

400 pages
15 x 22 cm
br.
29 €

Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques • ventes@cths.fr • vente en librairie ou sur notre site : www.cths.fr • Distribution Sodis

LOGIQUE & CALCUL

Une seule intelligence ?

Fabriquer de l'intelligence est un défi que l'informatique veut relever. Quand elle réussit, c'est toujours de manière limitée et en évitant d'aborder de front l'intelligence humaine, qui reste mystérieuse.

Jean-Paul DELAHAYE

L'idée qu'il existe plusieurs types d'intelligence séduit le grand public, car elle évite à chacun de se trouver en un point précis d'une échelle absolue et parce que chacun espère bien exceller dans l'une des formes d'intelligence dont la liste tend à s'allonger. Cette pluralité d'intelligences a été proposée par le psychologue américain Howard Gardner : dans son livre *Frame of Mind* de 1983, il énumère huit types d'intelligence. Très critiquée, par exemple par Perry Klein de l'Université d'Ontario qui la considère tautologique et non réfutable, cette théorie est à l'opposé d'une autre voie de recherche affirmant qu'il n'existe qu'une sorte d'intelligence à concevoir mathématiquement avec l'aide de l'informatique et de la théorie du calcul.

Dames, échecs, go

Évoquons d'abord l'intelligence des machines et la discipline informatique dénommée « intelligence artificielle ». Il faut l'admettre, aujourd'hui, les machines réussissent des prouesses qu'autrefois tout le monde aurait qualifié d'intelligentes. Nous ne reviendrons pas sur la victoire définitive de l'ordinateur sur les meilleurs joueurs d'échecs, consacrée en 1997 par la défaite de Garry Kasparov (champion du monde) face à l'ordinateur *Deep Blue*, unanimement saluée comme un événement majeur de l'histoire de l'humanité.

A cette époque, pour se consoler peut-être, certains ont remarqué que les meilleurs programmes pour jouer au jeu de go étaient d'une affligeante médiocrité. Or, depuis quelques années, des progrès spectaculaires ont été réalisés et aujourd'hui les machines, sans égaler les champions et les professionnels, ont atteint le niveau des très bons joueurs amateurs. En mars 2013, le programme *Crazy Stone* du chercheur français Rémi Coulom, de l'Université de Lille, a battu le joueur professionnel japonais Yoshio Ishida qui, au début de la partie, avait laissé un avantage de quatre pierres au programme. Le programme est considéré avoir un niveau de « sixième dan » (classement KGS) : il y a environ une dizaine de joueurs français à ce niveau, et moins de 500 dans le monde.

Le succès de l'intelligence artificielle au jeu de dames anglaises est absolu. Depuis 1994, aucun humain n'a battu le programme canadien *Chinook* et, depuis 2007, on sait que le programme joue une stratégie optimale, impossible à améliorer. Pour le jeu d'échecs, on sait qu'il existe aussi des stratégies optimales, mais leur calcul semble hors d'atteinte pour plusieurs décennies encore.

L'intelligence des machines ne se limite plus aux problèmes bien clairs de nature mathématique ou se ramenant à l'exploration d'un grand nombre de combinaisons. Cependant, les chercheurs en intelligence artificielle ont découvert, même avec les jeux de plateau cités, combien il est difficile

d'imiter le fonctionnement intellectuel humain : aux jeux de dames, d'échecs ou de go et bien d'autres, les programmes ont des capacités équivalentes aux meilleurs humains, mais ils fonctionnent très différemment. Cela ne doit pas nous interdire d'affirmer que nous avons mis un peu d'intelligence dans les machines : ce ne serait pas *fair-play*, face à une tâche donnée, d'obliger les machines à l'affronter en imitant servilement nos méthodes et modes de raisonnement.

Véhicules intelligents

Le cas des véhicules autonomes est remarquable aussi de ce point de vue. Il illustre d'une autre façon que lorsque l'on conçoit des systèmes nous imitant à peu près pour les résultats, on le fait en utilisant des techniques le plus souvent totalement étrangères à celles mises en œuvre en nous par la nature, et que d'ailleurs nous ne comprenons que très partiellement : pour le jeu d'échecs par exemple, personne ne sait décrire les algorithmes qui déterminent le jeu des champions.

La conduite de véhicules motorisés demande aux êtres humains des capacités qui vont bien au-delà de la simple mémorisation d'une quantité massive d'informations et de l'exploitation d'algorithmes traitant rapidement et systématiquement des données symboliques telles que des positions de pions sur un damier. Nul ne doute que pour conduire comme nous des

1. Des tests d'intelligence où la machine gagne

Les tests d'intelligence inventés par le psychologue français Alfred Binet (1857-1911) ne sont sans doute pas un bon moyen de mesurer l'intelligence des machines. En effet, des programmes dont il est impossible de soutenir qu'ils sont réellement intelligents obtiennent d'assez bons scores à certains de ces tests.

Par exemple, en 2003, Pritika Sanghi et David Dowe ont écrit un programme qui obtient un score proche du score humain moyen dans une grande variété de tests du type illustré ici.

Ce programme, pas très compliqué, se fonde sur quelques principes simples fréquemment utilisés par les créateurs de tests. En le perfectionnant, ce programme atteindrait probablement les meilleurs scores humains. Cela ne prouve pas que les programmes sont intelligents, mais plutôt que ces tests sont insuffisants pour caractériser et mesurer l'intelligence générale.

Une catégorie particulière de tests est d'ailleurs bien mieux réussie par la machine que par l'homme, et vous pouvez vous-même en faire l'expérience. Considérons par exemple la suite de nombres entiers :

3, 4, 6, 8, 12, 14, 18, 20, 24, 30, 32, 38, 42;

La question est : quels sont les trois nombres venant logiquement derrière ? Vous reconnaissez la suite des nombres premiers augmentés d'une unité : $2+1$, $3+1$, $5+1$, $7+1$, $11+1$, $13+1$, $17+1$, etc. Les nombres qui suivent sont donc : $43+1$, $47+1$, $53+1$, soit 44, 48, 54.

Il existe un site Internet (<https://oeis.org/>) qui répond parfaitement à ce type de tests :

L'« Encyclopédie des suites numériques en ligne » de Neil Sloane. En lui soumettant la question, il trouve instantanément la bonne réponse. Il propose d'ailleurs d'autres réponses que vous n'auriez pas imaginées. Celle qu'il indique en second est : nombres n tels que pour tout entier k premier avec n et supérieur à k^2 , le nombre $n - k^2$ est premier. Cette seconde

Considérez la suite



Quel dessin parmi ces quatre continue la suite ?



réponse logique conduirait à proposer les trois entiers : 48, 54, 60. Elle est beaucoup plus compliquée que la première et ne serait bien évidemment pas la réponse que donnerait un système programmé à partir de l'Encyclopédie à qui on demanderait de fournir une seule réponse.

La perspicacité de ce système est bien supérieure à celle d'un être humain. Pour vous en convaincre, essayez de résoudre les énigmes posées par les cinq suites suivantes :

A : 11, 12, 14, 16, 20, 21, 23, 25, 29
B : 11, 31, 71, 91, 32, 92, 13, 73
C : 3, 7, 14, 23, 36, 49
D : 1, 2, 4, 5, 10, 20, 29, 58, 116

E : 1, 4, 5, 7, 8, 11, 13, 14, 16, 22, 25, 28, 31, 34

Les réponses sont indiquées en

gras ci-dessous. Toutes ces réponses sont trouvées instantanément par le programme de l'Encyclopédie, et on peut lui soumettre des questions bien plus difficiles. Il n'est cependant pas raisonnable de considérer que ce programme est en quoi que ce soit intelligent. Il se contente d'aller rechercher la suite qu'on lui propose dans une base de données (soigneusement complétée depuis des années), et il fournit la plus simple des réponses (la notion de simplicité étant déterminée par le contenu de l'encyclopédie qui classe les

Complétez le tableau

2	4	8
3	6	12
4	8	?

suites). Le succès du programme provient de sa mémoire et de sa capacité à la parcourir rapidement sans erreur, alors qu'un humain, face à ce type de problèmes, mène des calculs de tête et tente directement de repérer des structures. Comme c'est le cas pour de nombreuses applications d'intelligence artificielle, la réussite - extraordinaire ici - du logiciel est obtenue par une méthode sans aucun rapport avec celle mise en œuvre par une intelligence humaine.

Récemment, on a réussi à programmer un système informatique pour qu'il joue et gagne à un jeu, Jeopardy!, demandant apparemment de

maîtriser un grand nombre de connaissances de culture générale et, en même temps, de comprendre le langage naturel (l'anglais).

Très populaire aux

Etats-Unis, Jeopardy! existe depuis 1962 et ressemble au jeu Questions pour un champion. Les questions (géographie, littérature, arts, sport et sciences) sont formulées en anglais courant et les réponses doivent l'être aussi. La machine reçoit les questions par écrit et donne ses réponses par synthèse vocale. La rapidité des réponses intervient dans certaines phases du jeu. Le programme Watson créé par la firme IBM a été confronté à deux champions humains du jeu en février 2011. Le programme l'emporta, montrant qu'un système informatique convenablement programmé pouvait s'attaquer à des défis comportant à la fois un

traitement du langage naturel et la maîtrise de connaissances sur des sujets variés et étendus.

Aujourd'hui, Watson sert à développer des outils d'expertise en médecine, pour la formation des médecins.

A : Nombres à partir de 10 dont la somme des chiffres est un nombre premier (30, 32, 34).

B : Nombres premiers écrits à l'envers à partir de 10 (14, 34, 74).

C : Le nombre en position n est la somme de n^2 et du n -ième nombre premier (66, 83, 104).

D : Diviseurs de 580 (145, 290, 580).

E : Nombres qui, précédés de 2 et suivis de 1, donnent des nombres premiers (35, 37, 38).

véhicules motorisés, l'ordinateur doit analyser des images variées et changeantes : où est le bord de cette rue jonchée de feuilles d'arbres ? Quelle est la nature de cette zone noire à 50 mètres au centre de la chaussée, un trou dangereux ou seulement une tache d'huile inoffensive ? Etc.

Conduire une voiture avec nos méthodes nécessiterait la mise au point de techniques d'analyse d'images bien plus subtiles que celles que nous savons programmer aujourd'hui. Aussi, les systèmes de pilotage automatisé tels que ceux de la firme *Google* « conduisent » tout à fait différemment des humains. Ces *Google cars* exploitent en continu un système GPS de géolocalisation très précis et des « cartes » indiquant de manière bien plus détaillée que toutes les cartes habituelles, y compris celles de *Google maps*, la forme et le dessin des chaussées, la signalisation routière et tous les éléments importants de l'environnement. Les voitures *Google* exploitent aussi des radars embarqués, des lidars (*light detection and ranging*, systèmes optiques créant une image numérique en trois dimensions de l'espace autour de la voiture) et des capteurs sur les roues.

Ayant déjà parcouru plusieurs centaines de milliers de kilomètres sans accident, ces voitures sont un succès de l'intelligence artificielle, et ce même si elles sont incapables de réagir à des signes ou injonctions d'un policier au centre d'un carrefour, et qu'elles s'arrêtent parfois brusquement lorsque des travaux sont en cours sur leur chemin. Par prudence sans doute, les modèles destinés au public présentés en mai 2014 roulent à 40 kilomètres par heure au plus.

Avec ces machines, on est loin de la méthode de conduite d'un être humain. Grâce à sa capacité à extraire de l'information des images et son intelligence générale, le conducteur humain sait piloter sur un trajet jamais emprunté, sans carte, sans radar, sans lidar, sans capteur sur les roues et il n'est pas paralysé par un obstacle inopiné !

Les questions évoquées jusqu'ici n'exigent pas la compréhension du langage écrit ou parlé. Pourtant, contrairement aux annonces de ceux qui considéraient le langage comme une source de difficultés insurmontables pour les machines, des succès remarquables

ont été obtenus dans des tâches exigeant une bonne maîtrise des langues naturelles.

L'utilisation des robots-journalistes inquiète car elle est devenue courante dans certaines rédactions telles que celles du *Los Angeles Times*, de *Forbes* ou de *Associated Press*. Pour l'instant, ces automates-journalistes se limitent à convertir des résultats (sportifs, ou économiques par exemple) en courts articles.

Des robots journalistes

Il n'empêche que, parfois, on leur doit d'utiles traitements. Ainsi, le 17 mars 2014, un tremblement de terre de magnitude 4,7 se produisit à 6 h 25 en heure locale au large de la Californie. Trois minutes après la secousse, un petit article d'une vingtaine de lignes était automatiquement publié sur le site Internet du *Los Angeles Times* donnant des informations sur l'événement : lieu de l'épicentre, magnitude, heure, comparaison avec d'autres secousses récentes. L'article exploitait des données brutes fournies par le *US-Geological Survey Earthquake Notification Service* et résultait d'un algorithme dû à Ken Schwencke, un journaliste programmeur. D'après lui, ces méthodes ne conduiraient à la suppression d'aucun emploi, mais rendraient au contraire le travail des journalistes plus intéressant. Il est vrai que ces programmes sont pour l'instant confinés à la rédaction d'articles brefs exploitant des données factuelles faciles à traduire en petits textes, qu'un humain ne rédigerait sans doute pas mieux.

Un autre exemple inattendu de rédaction automatique d'articles concerne les encyclopédies *Wikipedia* en suédois et en filipino, l'une des deux langues officielles aux Philippines (l'autre est l'anglais). Le programme *Lsjbot* mis au point par Sverker Johansson a en effet créé plus de deux millions d'articles de l'encyclopédie collaborative et est capable d'en produire 10 000 par jour. Ces pages engendrées automatiquement concernent des animaux ou des villes et proviennent de la traduction, dans le format imposé par *Wikipedia*, d'informations disponibles dans des bases de données déjà informatisées. L'exploit a été salué, mais aussi critiqué. Pour se justifier, S. Johansson indique que ces

pages peu créatives sont utiles et fait remarquer que le choix des articles de l'encyclopédie *Wikipedia* est biaisé : il reflète essentiellement les intérêts des jeunes blancs, de sexe masculin et amateurs de technologies. Ainsi, l'encyclopédie *Wikipedia* suédoise comporte 150 articles sur les personnages du livre de Tolkien, *Le Seigneur des Anneaux*, et seulement une dizaine sur des personnes réelles liées à la guerre du Vietnam : « Est-ce vraiment le bon équilibre ? », demande-t-il.

S. Johansson projette d'engendrer une page par espèce animale recensée, ce qui ne semble pas stupide. Pour lui, ces méthodes doivent être généralisées, mais il pense que *Wikipedia* a besoin aussi de rédacteurs qui écrivent de façon plus littéraire que *Lsjbot* et soient capables d'exprimer des sentiments, « ce que ce programme ne sera jamais capable de faire ».

Beaucoup plus complexe, et méritant mieux l'utilisation de l'expression « intelligence artificielle », est le succès du programme *Watson* d'IBM au jeu télévisé *Jeopardy* ! (voir l'encadré 1).

La mise au point de programmes résolvant les mots-croisés aussi bien que les meilleurs humains confirme que l'intelligence artificielle réussit à développer des systèmes aux étonnantes performances linguistiques et oblige à reconnaître qu'il faut cesser de considérer que le langage est réservé aux humains. Malgré ces succès, on est loin de la perfection : pour s'en rendre compte, il suffit de se livrer à un petit jeu avec le système de traduction automatique en ligne de *Google*. Une phrase en français, (a), est traduite en anglais, (b), puis retraduite en français, (c). Parfois cela fonctionne parfaitement, on retrouve la phrase initiale ou une phrase équivalente. Parfois, le résultat est catastrophique, comme ici :

(a) La subtilité manque aux machines qui semblent stupides.

(b) The lack subtlety machines that seem stupid.

(c) Les machines manque de subtilité qui semblent stupide.

Nous sommes très loin aujourd'hui de la mise au point de dispositifs informatiques susceptibles de passer le « test de Turing » conçu en 1950. Alan Turing voulait éviter

de discuter de la nature de l'intelligence et, plutôt que d'en rechercher une définition, proposait de considérer qu'on aura réussi à mettre au point des machines intelligentes lorsque leur conversation sera indiscernable de celle des humains.

Passer le test de Turing

Pour tester cette indiscernabilité, il suggérait de faire dialoguer par écrit avec la machine une série de juges qui ne sauraient pas s'ils mènent leurs échanges avec une machine tentant de se faire passer pour un humain ou avec un humain véritable. Lorsque les juges ne pourront plus faire mieux que répondre au hasard pour indiquer qu'ils ont eu affaire à un homme ou une machine, le test sera passé. Concrètement, faire passer

le test de Turing à un système informatique S consiste à réunir un grand nombre de juges, à les faire dialoguer aussi longtemps qu'ils le souhaitent avec des interlocuteurs choisis pour être une fois sur deux un humain, et une fois sur deux le système S; les experts indiquent, quand ils le souhaitent, s'ils pensent avoir échangé avec un humain ou une machine. Si l'ensemble des experts ne fait pas mieux que le hasard, donc se trompe dans 50 % des cas ou plus, alors le système S a passé le test de Turing.

Turing, optimiste, pronostiqua qu'on obtiendrait une réussite partielle au test en l'an 2000, les experts dialoguant 5 minutes et prenant la machine pour un humain dans 30 % des cas au moins. Turing avait, en gros, vu juste : depuis quelques années, la version partielle du test a été passée, sans qu'on

puisse prévoir quand sera passé le test complet, sur lequel Turing restait muet.

Le test partiel a par exemple été passé le 6 septembre 2011 à Guwahati, en Inde, par le programme *Cleverbot* créé par l'informaticien britannique Rollo Carpenter. Trente juges dialoguèrent pendant quatre minutes avec un interlocuteur inconnu qui était dans la moitié des cas un humain et dans l'autre moitié des cas le programme *Cleverbot*. Les juges et les membres de l'assistance (1334 votes) ont considéré le programme comme humain dans 59,3 % des cas. Notons que les humains ne furent considérés comme tels que par 63,3 % des votes.

Plus récemment, le 9 juin 2014 à la *Royal Society* de Londres, un test organisé à l'occasion du soixantième anniversaire de la mort de Turing permit à un programme

2. Le concours de compression de Marcus Hutter

Face à une série de données, l'intelligence permet de prévoir la suite mieux que ne le ferait le hasard. On montre que cette capacité de prévision est équivalente à la capacité de compresser les données reçues. À condition d'imaginer des jeux de données très variés, cette conception de l'intelligence est considérée par certains comme absolue.

C'est elle qui sert d'ailleurs de base à la « théorie générale de l'intelligence » de Marcus Hutter. Ce dernier, pour illustrer l'idée et parce qu'il est convaincu que la compression de données est nécessaire et suffisante pour caractériser et mesurer l'intelligence d'un être animal, humain ou mécanique, a créé un concours fondé sur une épreuve de compression de données. Ce concours est ouvert à tous et permet de gagner tout ou partie d'une somme de 50 000 euros que M. Hutter a lui-même engagée.

Le prix (nommé *Hutter prize*, voir <http://prize.hutter1.net/>) propose une épreuve unique de compression d'un texte numé-

rique énorme. Un fichier de 100 millions de caractères extrait de l'encyclopédie *Wikipedia* est proposé aux candidats et doit être compressé au mieux par les programmes qui sont soumis. Au départ, le fichier, grâce à une méthode de compression classique, a été réduit à 18 324 887 caractères. Cela correspond à un gain d'environ 81 %. Chaque candidat proposant un programme réalisant une amélioration de N % par rapport au gagnant précédent remporte la somme de $(N/100) \times 50\,000$ euros. Si par exemple vous concevez et programmez un compresseur qui fait gagner 5 % par rapport au dernier gagnant, vous

emportez 2500 euros. La compression dont il s'agit ici est bien sûr une compression sans perte : à partir du fichier compressé, le programme de décompression (associé au programme de compression) doit reconstituer exactement les 100 millions de caractères du fichier initial proposé par M. Hutter. Des limites concernant la taille du programme de compression et son temps de calcul sont imposées (voir les détails sur le site Internet décrivant le prix).

Depuis le lancement du concours, plusieurs programmes ont réussi à améliorer le taux de compression. On en est aujourd'hui à un fichier compressé de 15 949 688 caractères. Claude Shannon, le créateur de la théorie de l'information, a évalué que le langage naturel porte en gros un bit d'information par caractère, ce qui correspond dans notre cas à un fichier



UNE COMPRESSION RÉALISÉE par le sculpteur César.

compressé de 12 500 000 caractères. Il y a donc encore de la marge, d'autant que l'exploitation fine des régularités de notre monde reflétée dans l'encyclopédie *Wikipedia* permettrait peut-être une compression encore meilleure que celle évaluée par Shannon.

nommé *Eugene Goostman* de duper 10 des 30 juges réunis (33 % d'erreur). Victimes de la présentation biaisée que donnèrent les organisateurs de ce succès, somme toute assez modeste, de nombreux articles de presse dans le monde entier parlèrent d'un événement historique, comme si le test complet d'indiscernabilité homme-machine avait été réussi. Ce n'était pas du tout le cas, puisque le test avait d'ailleurs encore été affaibli : l'humain que le système

Ainsi, l'intelligence artificielle réussit aujourd'hui assez brillamment à égaler l'humain pour des tâches spécialisées (y compris exigeant une certaine maîtrise du langage), ce qui parfois étonne et doit être reconnu comme des succès d'une discipline qui avance régulièrement. Cependant, elle le fait sans vraiment améliorer la compréhension qu'on a de l'intelligence humaine, qu'elle ne copie quasiment jamais ; cela a en particulier comme conséquence qu'elle

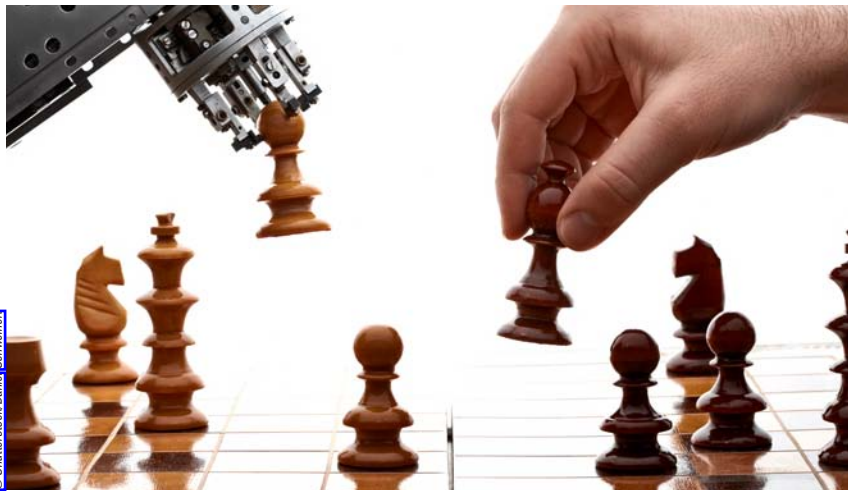
on se trouve. L'identification des régularités, on le sait par ailleurs, permet de compresser des données, et de prédire avec succès les données suivantes qu'on recevra.

Intelligence, compression et prédiction sont liées. Si, par exemple, on vous communique les données 4, 6, 9, 10, 14, 15, 21, 22, 25, 26, 33, 34, 35, 38, 39, 46, 49, 51, 55, 57, et que vous en reconnaissez la structure, vous pourrez les compresser en « les 20 premiers produits de deux nombres premiers » et deviner ce qui va venir : 58, 62, 65, 69, 74, 77, 82, 85, 86, 87, etc.

Ce lien entre intelligence, compression et prédiction a été exprimé de manière formelle par l'informaticien américain Ray Solomonoff vers 1965. Du principe du rasoir d'Ockham *Pluralitas non est ponenda sine necessitate* (les multiples ne doivent pas être utilisés sans nécessité), il proposait une version moderne exprimée ainsi : « Entre toutes les explications compatibles avec les observations, la plus concise, ou encore la mieux compressée, est la plus probable ».

Si l'on dispose d'une mesure de concision permettant de comparer les théories, cette dernière version devient un critère mathématique. La théorie algorithmique de l'information de Kolmogorov, qui propose de mesurer la complexité (et donc la simplicité) de tout objet numérique (une théorie le devient une fois entièrement décrite) par la taille du plus court programme qui l'engendre, donne cette mesure de concision et rend donc possible la mathématisation complète du principe de parcimonie d'Ockham.

L'aboutissement de cette voie de réflexion et de mathématisation a été la théorie générale de l'intelligence développée par l'informaticien allemand Marcus Hutter, dont le livre *Universal Artificial Intelligence* publié en 2005 est devenu une référence. En utilisant la notion mathématique de concision, une notion mathématisée d'environnement (ce qui produit les données desquelles un système intelligent doit tenter de tirer quelque chose) et le principe mathématisé d'Ockham de Solomonoff, M. Hutter définit une mesure mathématique universelle d'intelligence. Elle est obtenue comme la réussite moyenne



informatique simulait était censé n'avoir que 13 ans et ne pas écrire convenablement l'anglais (car d'origine ukrainienne !).

Non, le test de Turing n'a pas été passé, et il n'est sans doute pas près de l'être. Il n'est d'ailleurs pas certain que les tests partiels fassent avancer vers la réussite au test complet. En effet, les méthodes utilisées pour tromper brièvement les juges sont fondées sur le stockage d'une multitude de réponses préenregistrées (correspondant à des questions qu'on sait que les juges posent) associées à quelques systèmes d'analyse grammaticale pour formuler des phrases reprenant les termes des questions des juges et donnant l'illusion d'une certaine compréhension. Quand ces systèmes ne savent plus quoi faire, ils ne répondent pas et posent une question. À un journaliste qui lui demandait comment il se sentait après sa victoire, le programme *Eugene Goostman* de juin 2014 répondit : « Quelle question stupide vous posez, pouvez-vous me dire qui vous êtes ? ».

n'est pas sur le point de proposer des systèmes disposant vraiment d'une intelligence générale, chose nécessaire pour passer le difficile test de Turing qui reste hors de portée aujourd'hui (si on ne le confond pas avec ses versions partielles !).

À la recherche de l'intelligence générale

Ces tentatives éclairent les recherches tentant de saisir ce qu'est une intelligence générale. Ces travaux sont parfois abstraits, voire mathématiques, mais n'est-ce pas le meilleur moyen d'accéder à une notion absolue, indépendante de l'homme ?

Quand on tente de formuler une définition générale de l'intelligence, vient assez naturellement à l'esprit l'idée qu'être intelligent, c'est repérer des régularités, des structures dans les données dont on dispose, quelle qu'en soit leur nature, ce qui permet de s'y adapter et de tirer le maximum d'avantages de la situation évolutive dans laquelle

d'une stratégie dans l'ensemble des environnements envisageables.

Cette dernière notion (dont nous ne formulons pas ici la version définitive avec tous ses détails techniques) est trop abstraite pour être utilisable directement dans des applications. Cependant, elle permet le développement mathématique d'une théorie de l'intelligence et fournit des pistes pour comparer sur une même base abstraite, non anthropocentrée et objective, toutes sortes d'intelligences. Contrairement à l'idée de H. Gardner, cette voie de recherche soutient que l'intelligence est unique, qu'on peut dépasser le côté arbitraire des tests d'intelligence habituels pour classer sur une même échelle tous les êtres vivants ou mécaniques susceptibles d'avoir un peu d'intelligence.

Malgré la difficulté à mettre en œuvre pratiquement la théorie (par exemple pour concevoir de meilleurs tests d'intelligence, ou des tests s'appliquant aux humains comme aux dispositifs informatiques), on a sans doute franchi un pas important avec cette théorisation complète. Conscients de son importance pour la réussite du projet de

l'intelligence artificielle, les chercheurs ont maintenant créé un domaine de recherche particulier sur ce thème de « l'intelligence artificielle générale » qui dispose de sa propre revue spécialisée, le *Journal of General Artificial Intelligence* (à accès libre).

Dans le but sans doute d'éviter à la discipline de se satisfaire du développement de sa partie mathématique, un concours informatique a été créé par M. Hutter. Il utilise l'idée que plus on peut compresser, plus on est intelligent. Pour gagner et empocher une partie des 50 000 euros mis en jeu, il faut compresser au mieux le contenu de l'encyclopédie *Wikipedia* considéré comme une sorte d'image miniature de la richesse de notre univers (voir l'encadré 2).

La nouvelle discipline aidera peut-être les chercheurs à réaliser cette intelligence générale qui manque tant à nos machines actuelles et les oblige à n'aborder que des tâches spécialisées, le plus souvent en contournant les difficultés qu'il y aurait à employer les mêmes méthodes que les humains, qui eux disposent – au moins de façon rudimentaire ! – de cette intelligence générale. ■

L'AUTEUR



J.-P. DELAHAYE est professeur émérite à l'Université de Lille et chercheur

au Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille (LIFL).

BIBLIOGRAPHIE

B. Goertzel, *Artificial general intelligence : Concept, state of the art, and future prospects*, *Journal of Artificial General Intelligence*, prépublié en ligne, juin 2014 (<http://tinyurl.com/ln86g5b>).

M. Hutter, *50 000 euros prize for compressing human knowledge*, <http://prize.hutter1.net/>, consulté en 2014.

G. Tesouro et al., *Analysis of Watson's strategies for playing Jeopardy!*, 2014 (<http://arxiv.org/pdf/1402.0571.pdf>).

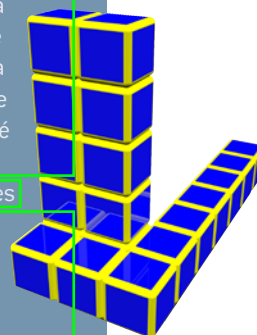
D. Dowe et J. Hernández-Orallo, *How universal can an intelligence test be*, *Adaptive Behavior*, vol. 22(1), pp. 51-69, 2014.

Références supplémentaires sur le site www.pourlascience.fr

Retour sur les golyèdres

Dans le numéro de septembre 2014, je présentais les « golyèdres », des polyèdres composés de cubes de côté unité accolés, et dont les différentes faces ont des aires valant exactement 1, 2, 3, ..., n . On montrait que la plus petite valeur de n pour laquelle un golyèdre existe est 11 ou 12. Un golyèdre à 12 faces était dessiné, mais cela n'excluait pas l'existence d'un golyèdre à 11 faces, existence qui restait donc en question. Or un tel golyèdre à 11 faces vient d'être trouvé (ci-contre) par Alexei Nigin. Il est assez étrange que ce golyèdre, plus simple que les quatre autres déjà connus, ait été trouvé si tardivement !

Une autre question posée dans l'article a été résolue. Si, pour définir les golyèdres, on remplace les cubes par des tétraèdres réguliers dont chaque face a une aire unité, existe-t-il des golyèdres ? Gilles Esposito-Farèse m'a fait remarquer que le tétraèdre régulier ne pave pas l'espace et donc que, en collant par leur face des tétraèdres réguliers dont les faces ont pour aire l'unité, on ne construit jamais de face ayant plusieurs unités d'aire. Il n'existe ainsi pas de golyèdres faits de tétraèdres réguliers. J'ai cependant une consolation : Aristote pensait aussi que le tétraèdre régulier, comme le cube, pavait l'espace et l'écrivit dans son *Traité du ciel*. Son erreur, inaperçue pendant près de 1 800 ans, fut révélée par Johannes Müller (1436-1476).



Retrouvez la rubrique Logique & calcul sur www.pourlascience.fr

SCIENCE & FICTION

Les cyborgs sont parmi nous !

À la frontière entre le robot et l'homme, le cyborg est un thème récurrent en science-fiction. Les progrès de la science posent la question de sa définition et de celle de l'humanité. Ne serions-nous pas déjà des cyborgs ?

Jean-Sébastien STEYER et Roland LEHOUCQ

Un cinquième opus de la saga *Terminator* est en cours de tournage : *Terminator Genisys*. Lors d'une conférence de presse, Arnold Schwarzenegger précise la nature de son personnage : « La manière dont le personnage est écrit, c'est une machine en dessous. C'est un squelette en métal mais, au-dessus, c'est de la peau humaine. Et la peau du Terminator vieillit, exactement comme la peau des êtres humains. Peut-être pas aussi vite, mais elle vieillit véritablement. » Terminator, que l'on pensait artificiel à 100 %, ne serait donc pas un robot mais un cyborg. Ces êtres dépassent aujourd'hui la fiction et posent la question de la frontière de plus en plus ténue entre l'humain et la machine.

Il faut distinguer le cyborg du robot. Le second est composé exclusivement d'alliages métalliques, de composants électroniques et autres matériaux synthétiques (on parle de dispositif « mécatronique »). Sa définition ne pose pas de problème et le robot fait maintenant partie de notre quotidien. Comme son nom l'indique (*robota* signifie « corvée » ou « travail » en tchèque), le robot est créé par l'homme pour le remplacer dans des tâches pénibles et répétitives, du travail à la chaîne à l'exploration sous-marine ou martienne, en passant par la guerre.

Le terme de cyborg (contraction de l'anglais *cybernetic organism*) fait référence, lui, à un mélange entre l'organique et le mécanique, il allie des matériaux artificiels et des tissus vivants. Plus récent, ce concept

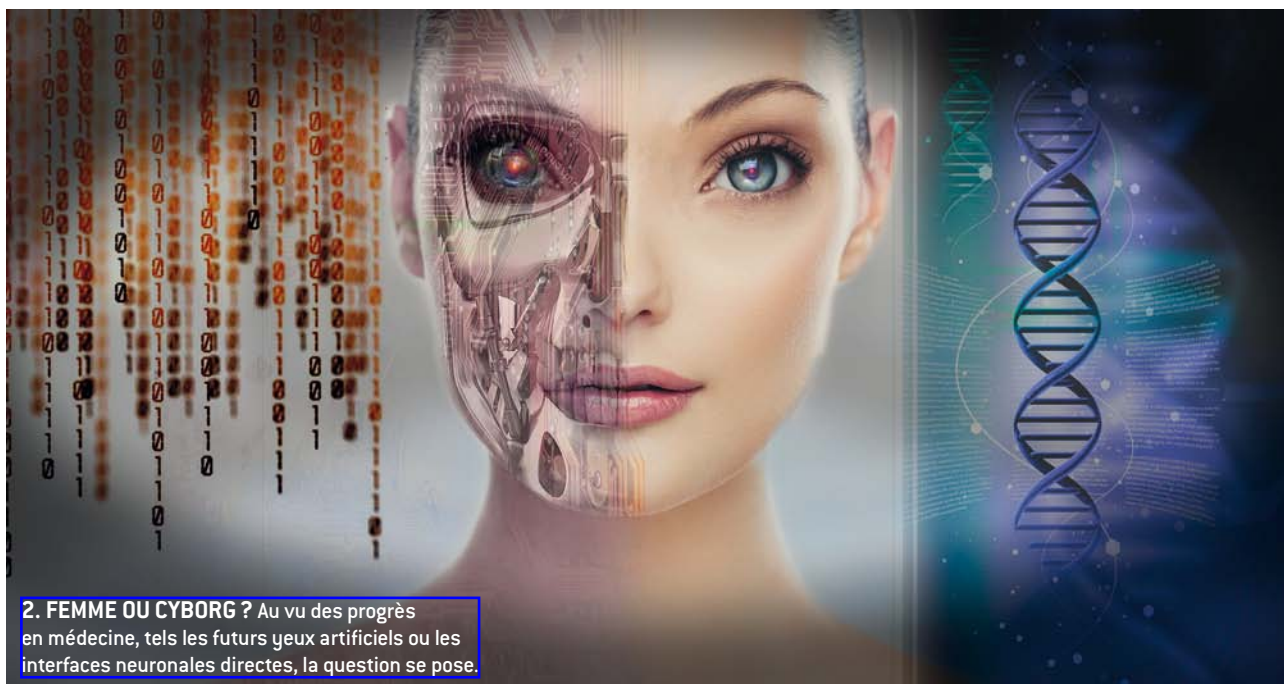


1. TERMINATOR EST UN CYBORG, à mi-chemin entre l'homme et le robot. Son squelette métallique est recouvert de peau organique.

a été développé en 1960 par les Américains Manfred Clynes et Nathan Kline dans un article exposant les avantages d'un humain « augmenté » pour explorer l'espace. Mais déjà Edgar Allan Poe, dans sa nouvelle *The Man That Was Used Up* (L'homme qui était refait, 1839), mettait en scène un homme étrange muni de nombreuses prothèses. Citons aussi Jean de la Hire qui, dans son roman *L'homme qui peut vivre dans l'eau* (1908), introduisit le Nyctalope au cœur artificiel, premier super-héros et cyborg de la littérature !

Bien avant *Terminator*, ces écrivains visionnaires s'étaient donc posé la question : à partir de combien d'implants un homme n'en est-il plus un et quels critères marquent la séparation entre l'homme et le cyborg ? La question se pose aujourd'hui en médecine lorsque l'on pense par exemple aux *pace-makers* – permettant aux victimes d'attaques cardiaques de rester en vie – ou aux prothèses médicales de plus en plus perfectionnées comme le cœur artificiel récemment implanté chez un patient français ou l'œil artificiel, encore en développement.

Ces éléments de technologie « embarquée », qui repoussent les frontières du handicap ou de la mort, font-ils de nous des cyborgs avant l'heure ? Au-delà du fait que notre système immunitaire rejette (ou non) le greffon – qu'il soit synthétique ou biologique –, la question se pose bien sûr en termes philosophiques et éthiques : jusqu'où peut-on « réparer » l'homme ?



2. FEMME OU CYBORG ? Au vu des progrès en médecine, tels les futurs yeux artificiels ou les interfaces neuronales directes, la question se pose.

Dans la série *L'homme qui valait trois milliards*, Steve Austin, astronaute devenu pilote d'essai, est mutilé après un crash. Son œil gauche, son bras droit et ses jambes sont alors remplacés par des prothèses coûteuses qui font de lui un homme « augmenté ».

Il a plus de chance qu'Alex Murphy, ancien policier déclaré cliniquement mort à la suite d'un attentat, mais soigneusement réparé et transformé en Robocop. Ce dernier semble plus près de la machine que de l'homme. Il ne sert alors plus que les intérêts d'une société hypersécuritaire et corrompue : sa mémoire a été effacée et son cerveau est connecté en permanence à la base de données des fugitifs recherchés par la police. Mais, étrangement, ce cyborg fait encore preuve de sentiments humains et se révolte.

Cyborg malgré lui

Cette fiction rappelle celle, véridique, de Johnny Ray. Cet homme souffrait du syndrome d'enfermement (une paralysie totale) après une attaque cérébrale. Le neurologue Philip Kennedy l'a opéré en 1997 et a implanté dans son cerveau une « interface neuronale directe », c'est-à-dire une sorte d'électrode qui transmet aux muscles le signal électrique émis par le cerveau. Le patient a retrouvé une partie de sa motricité jusqu'à son décès en 2002. Les travaux sur les interfaces neuronales ont bien avancé depuis, si bien que l'on parle maintenant de « neuroprothèses » capables de restaurer l'ouïe, la vue et certains

mouvements : il s'agit de rendre à des patients certaines de leurs capacités perdues à la suite d'une maladie ou d'un accident. Ces prothèses, qui raccourcissent la chaîne cerveau-nerfs-muscles et réduisent parfois de plusieurs dixièmes de seconde le temps de réponse, intéressent aussi les militaires : l'armée américaine effectue déjà des recherches dans le but d'améliorer les performances de ses troupes.

L'accélération des capacités techniques, la convergence entre nanotechnologie, biotechnologie, sciences cognitives et techniques de l'information rendent plus crédibles l'hypothèse d'une humanité profondément modifiée par la technique. Cette tendance est encouragée par le mouvement transhumaniste qui promeut la fusion entre l'humain et la machine, d'abord pour réparer, puis pour transformer et augmenter. Mais comment s'assurer qu'un tel monde ne creuse pas des inégalités entre ceux qui ont accès aux techniques et les autres ?

Aujourd'hui, deux aspects techniques semblent encore séparer les cyborgs des hommes. Les premiers sont incapables de générer la totalité de l'énergie nécessaire à leur fonctionnement : après chaque mission, Robocop doit revenir dans son laboratoire pour se recharger. Le T-800, modèle initial du Terminator, est censé, grâce à une « batterie nucléaire à iridium », être autonome pendant au moins trois ans. Mais vu la demi-vie courte de l'iridium 192 (74 jours), il aurait été plus adapté d'utiliser une bat-

terie au plutonium 238, déjà employée dans les générateurs thermoélectriques des sondes spatiales et dont la demi-vie est proche de 88 ans. Cependant, ce dispositif n'est pas assez compact pour loger dans le torse du Terminator.

Autre différence essentielle entre le vivant et les cyborgs : les derniers ne sont pas capables de se reproduire en totalité d'une manière indépendante – même si aujourd'hui une imprimante 3D, donc un robot, peut créer des pièces détachées de robot.

Si l'on peut se demander à partir de quel seuil de technologie – et de tolérance – l'homme allié à la machine perd son identité humaine, la question se pose aussi dans l'autre sens : si l'intelligence artificielle devient vraiment performante, à partir de quand une hypothétique machine intelligente deviendrait-elle humaine ? Dans l'excellent manga *Ghost in the Shell* (Masamune Shirow, 1989), certains androïdes – robots de forme humaine – prennent conscience d'eux-mêmes et, désespérés, se suicident. Et Philip K. Dick de nous rappeler, dans son roman devenu référence *Les androïdes rêvent-ils de moutons électriques ?* (1966, adapté à l'écran par Ridley Scott en 1982 sous le titre *Blade Runner*), que des robots doués de compassion valent peut-être mieux que des cupides et égoïstes humains... ■

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

ART & SCIENCE

Mondrian et les arbres

Une méthode de visualisation de données rend hommage au peintre néerlandais, célèbre pour ses compositions abstraites. Elle est fondée sur l'idée d'arbre, un motif essentiel dans l'évolution de l'œuvre de Mondrian.

Loïc MANGIN

Depuis le 16 octobre 2014 et jusqu'au 15 avril 2015, l'Académie américaine des sciences, à Washington, propose une exposition étonnante. L'une des œuvres exposées est représentée sur la page ci-contre. Une composition du peintre néerlandais Piet Mondrian (1872-1944) ? Pas tout à fait. Même si la ressemblance avec, par exemple, l'œuvre *Composition C (n° III)* avec rouge, jaune et bleu est évidente, il s'agit de bien autre chose. En fait, l'exposition, intitulée *Every AlgoRiThm has ART in it: Treemap Art Project*, est dédiée aux réalisations de Ben Shneiderman, qui est... professeur émérite d'informatique à l'Université du Maryland, à *College Park* ! Quels sont les liens entre le pionnier de l'abstraction et l'informatique ? Ils sont plus profonds qu'il n'y paraît.

D'abord, voyons en quoi consiste l'œuvre qui se prend pour un Mondrian. C'est une *treemap*, c'est-à-dire une façon de visualiser des données. L'idée est de représenter des informations selon un mode hiérarchique dans un espace limité, en l'occurrence un rectangle. Le concept a été inventé par B. Shneiderman lui-même, au début des années 1990.

Confronté à un serveur informatique souvent saturé, il cherche à repérer les fichiers et les dossiers volumineux. Il développe alors une méthode pour représenter l'espace occupé par chacun des éléments du disque de stockage. Le point de départ

est l'arborescence du contenu (le *tree* de *treemap* signifie *arbre*) : chaque branche est transformée en un rectangle qui est ensuite pavé de rectangles plus petits correspondant aux sous-branches et ainsi de suite jusqu'aux fichiers, eux-mêmes illustrés par des rectangles. À chaque fois, la superficie d'un rectangle est proportionnelle au volume de son contenu (*voir la figure ci-dessous*). Un algorithme se charge de faire en sorte que l'ensemble occupe également un rectangle.



D'autres caractéristiques, telles que la couleur, peuvent aider à se repérer dans l'ensemble des données. En fin de compte, l'arborescence et les éléments qui y sont rattachés sont projetés sur un plan, ou une carte (*map* en anglais), un peu comme si on regardait du dessus un arbre.

Cette technique a fait florès et on l'utilise aujourd'hui pour visualiser et analyser le budget d'un État, les résultats détaillés d'une élection, la nature des exportations d'un pays, la population urbaine mondiale,

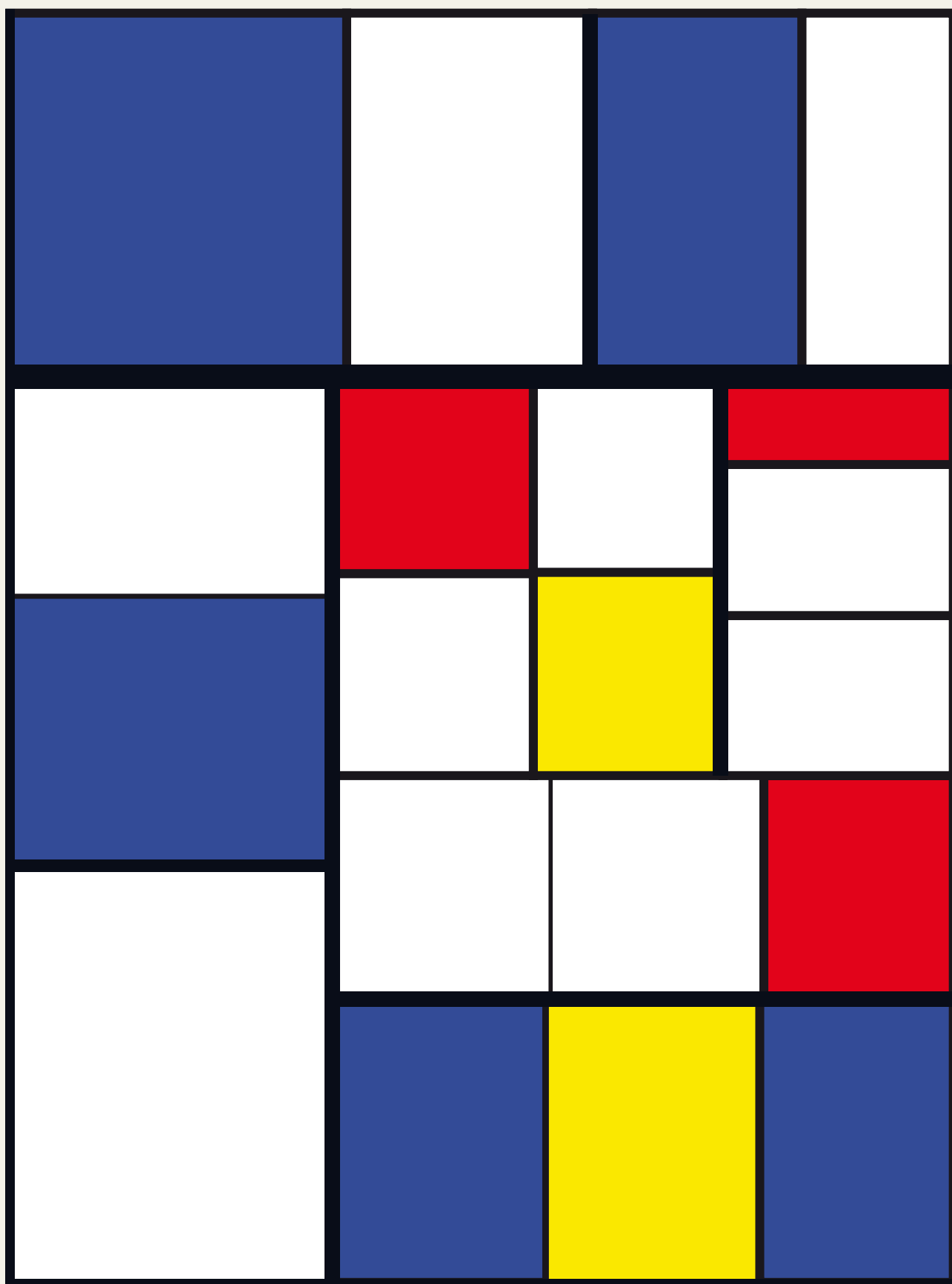
les émissions mondiales de dioxyde de carbone... Qu'en est-il de la *treemap* Mondrian ?

B. Shneiderman s'est intéressé au palmarès dressé par une webradio américaine à l'occasion de son dixième anniversaire. Les 20 premiers artistes sont représentés par un rectangle dont la surface rend compte de leur popularité (le nombre de fois où ils ont été écoutés). La couleur correspond au genre : le rock en blanc, la pop en jaune, les musiques alternatives en bleu et le hip-hop en rouge.

Le choix des couleurs de la *treemap* est ici un hommage à Mondrian, et ce n'est pas fortuit. En effet, des historiens de l'art mettent en avant la place centrale du motif de l'arbre qui aurait conduit l'artiste vers l'abstraction.

Schématiquement, jusqu'à la fin des années 1900, les arbres sont fréquents dans les peintures de Mondrian, mais ils sont surtout des éléments dans des paysages où ils sont néanmoins essentiels. C'est le cas de *Arbres le long du Gein* (1907) ou de *Peupliers rouges au couchant* (1908). Ensuite, l'arbre devient le sujet unique, notamment dans *Soir : l'arbre rouge* (1910) et *L'Arbre gris* (1911). Enfin, la transition vers l'abstraction commence avec *Pommier en fleurs* (1912) et *Composition VII* (1913). L'arbre s'estompe et est progressivement remplacé par des lignes verticales et horizontales, vestiges des branches. Mondrian est le père spirituel des *treemaps* ! ■

Le site de l'exposition : <http://bit.ly/1q7QAxg>
Le catalogue de l'exposition : <http://bit.ly/1rG27TX>



Ben Stederman

IDÉES DE PHYSIQUE

Batailles de toupies

L'équilibre des toupies, que les joueurs cherchent à perturber chez leurs adversaires, est étonnant. Sa clef ? Le couple gyroscopique.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

« Trois, deux, un... hyper-vitesse ! », s'écrient les enfants en lançant dans l'arène leurs toupies *Beyblade* (nom d'une série de mangas) d'attaque, de défense ou d'endurance (voir la figure 1). Quelle sera la dernière toupie à rester debout tandis que les autres auront été déséquilibrées par une collision ou éjectées de l'arène, ou auront simplement cessé de tourner ? Et qu'est-ce qui différencie les toupies d'attaque de celles de défense ou d'endurance ?

Immobile sur sa pointe, une toupie tombe quand on la lâche. Mais lorsqu'elle tourne rapidement autour de son axe, elle entame un mouvement dit de précession, l'axe décrivant un cône autour de la verticale (voir la figure 3). D'où provient cette stabilité et qu'est-ce qui empêche la toupie de tomber ?

Rotation rapide, couple intense

Pour le comprendre, commençons par une expérience plus simple et facile à reproduire chez soi. Prenons une roue de vélo dont l'axe de rotation est muni de poignées. Saisissons ces dernières de telle sorte que l'axe soit horizontal devant nous, la roue étant verticale. Un comparse fait alors tourner rapidement la roue de telle façon que son sommet s'éloigne de notre tronc (voir la figure 2). Ensuite, faisons tourner les poignées comme un guidon, afin de faire pivoter la roue vers la gauche.

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>

Quelque chose d'inattendu se produit : nous ressentons une résistance au mouvement de rotation, tandis que la roue a tendance à basculer sur le côté droit. C'est l'action du couple gyroscopique, d'autant plus intense que la rotation de la roue est rapide.

Quelle est l'origine de ce couple gyroscopique ? Piquons une punaise colorée sur la périphérie du pneu et analysons son mouvement. Lorsque la roue tourne à vitesse constante autour de l'axe horizontal, la trajectoire est un cercle vertical et l'accélération de la punaise est dirigée vers le centre. Cela signifie que la force qu'elle subit de la part de la roue est une force centripète, dirigée



1. LES COMBATS DE TOUPIES se déroulent dans une arène incurvée, avec des toupies dont on peut modifier les caractéristiques (pointe, couronne, masse) de façon à en faire des toupies d'attaque (a), de défense (b) ou d'endurance (c). Chaque joueur tente d'éjecter ou déstabiliser les toupies adverses ; il gagne quand la sienne est la dernière à rester en équilibre dans l'arène.

vers l'intérieur; réciproquement, en vertu de la loi de l'action et de la réaction, elle exerce sur la roue une force centrifuge, c'est-à-dire dirigée vers l'extérieur.

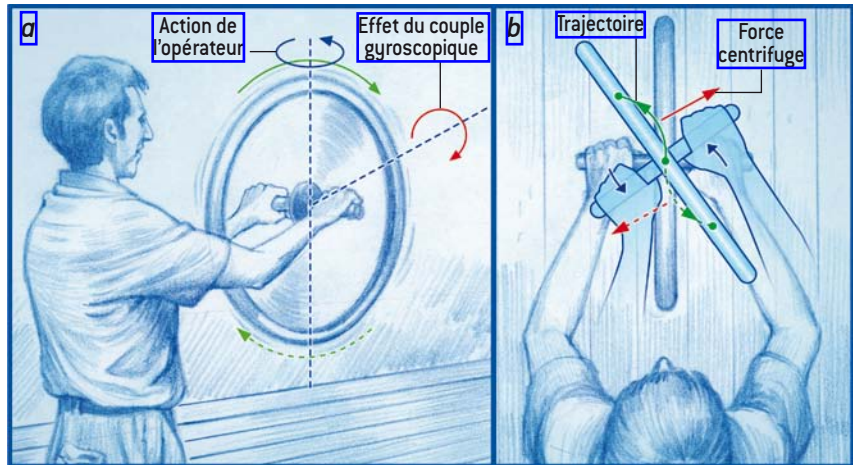
Qu'en est-il lorsque nous tournons lentement la roue vers la gauche ? La trajectoire de la punaise n'est plus un cercle parfait : quand la punaise est en haut, sa trajectoire s'incurve vers la gauche. Cela signifie qu'à son accélération centripète vient s'ajouter une accélération vers la gauche. Il en résulte une force supplémentaire, exercée par la punaise sur la roue et dirigée vers la droite. Lorsque la punaise est en bas et qu'elle se rapproche de nous, sa trajectoire s'incurve cette fois vers la droite, d'où une force supplémentaire sur la roue dirigée vers la gauche, mais de même intensité que la précédente.

Si la punaise nous a aidés à visualiser le mouvement, les conclusions qui précèdent s'appliquent aussi à un morceau de pneu situé en haut ou en bas de la roue ; et en raison du caractère solide du matériau, ces forces nouvelles viennent s'appliquer sur la jante.

Pour les autres morceaux du pneu, il est plus difficile de visualiser les trajectoires, mais le calcul montre que chaque morceau de pneu exerce sur la jante une force dirigée vers la droite dans la moitié supérieure de la roue, et vers la gauche dans la partie inférieure. Globalement, ces forces se compensent, mais elles créent un couple qui tend à faire basculer le plan de la roue vers la droite. Ce couple gyroscopique est perpendiculaire à la fois à l'axe de rotation rapide et à l'axe de la rotation imprimée par nos mains à la roue.

Stabilité gyroscopique grâce à la précession

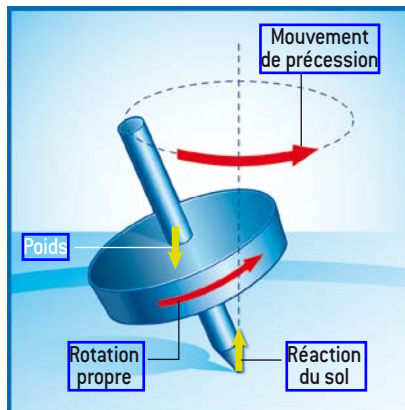
C'est ce couple gyroscopique qui stabilise une toupie, grâce à un mécanisme particulier. Habituellement, pour maintenir un objet dans une certaine position, nous exerçons une force opposée à son déplacement afin de le ramener vers sa position initiale. Mais ce n'est pas la seule solution possible. Si l'on vous pousse dans le dos, plutôt que de résister, vous pouvez esquiver en continuant à avancer, mais en tournant vers



2. QUAND ON ESSAIE DE FAIRE PIVOTER LA ROUE, en rotation rapide, vers la gauche, une résistance apparaît et la roue tend à s'incliner vers la droite (a). C'est l'effet du couple gyroscopique (b) : la trajectoire des points de la roue (en vert ; seuls les points haut et bas sont illustrés) n'étant plus circulaire, des forces centrifuges supplémentaires apparaissent, dont l'effet global est un couple qui tend à incliner la roue.

la gauche. Vous allez alors effectuer un cercle et revenir à votre position initiale, sans jamais vous être opposé à la force qui vous meut.

C'est exactement le cas pour les toupies. Lorsqu'on cherche à déstabiliser une toupie verticale, son sommet décrit un cercle autour de la verticale, un cercle d'autant plus petit que la rotation de la toupie est rapide. Lorsque le facteur déstabilisant est le poids (c'est le cas lorsque la toupie est lâchée en étant inclinée), l'effet est le même. Au lieu de tomber, l'axe de la toupie se met à tourner autour de la verticale : c'est le mouvement de précession. La rotation et la précession de la toupie créent un couple gyroscopique qui compense le couple dû au poids. Autrement dit, la toupie n'échappe pas au poids, mais elle réussit en quelque sorte à l'esquiver.



3. UNE TOUPIE LÉGÈREMENT INCLINÉE ne tombe pas : le couple gyroscopique, créé par la rotation rapide et le mouvement de précession, compense le couple dû au poids et à la réaction du sol.

Qu'en est-il alors des toupies de combat qui passionnent tant les enfants ? L'arène dans laquelle elles évoluent est une sorte de grand bol. Pour tenter de gagner, il est possible de modifier les caractéristiques de la toupie : la forme de la pointe, la couronne qui entre en contact avec les toupies adverses ou la masse centrale qui, avec la couronne, détermine l'inertie de la toupie (cette dernière est d'autant plus élevée qu'on éloigne la masse de l'axe de rotation).

BIBLIOGRAPHIE

L'explication classique du couple gyroscopique fait appel à la conservation du moment cinétique. Voir par exemple : E. Hecht, **Physique** (chapitre « Mouvement de rotation »), de Boeck, 1999.



Retrouvez la rubrique
Idées de physique sur
www.pourlascience.fr

Pour tourner le plus longtemps possible, les joueurs utilisent des toupies d'endurance. Leurs pointes sont en forme de cône, très pointu, afin de réduire au minimum le frottement avec le support.

La stratégie d'endurance n'est cependant pas infaillible. Les toupies d'attaque, en cognant les toupies, peuvent les éjecter de l'arène ou les faire tomber en les déstabilisant. Pour créer des chocs violents, la base d'une toupie d'attaque est plate. Ainsi, puisque l'arène n'est pas plane, le contact de la base sur le support est un cercle qui agit comme une roue et anime la toupie de déplacements rapides. En outre, la couronne d'une telle toupie est crantée et très irrégulière, de façon à ajouter au choc le mouvement de ces aspérités dû à la rotation de la toupie sur elle-même.

Pour ne pas voir son jouet éjecté ou déstabilisé par une collision avec une toupie

d'attaque, on peut opter pour une toupie de défense. Elle est plus massive pour ne pas être éjectée, sa couronne est lisse pour ne pas accrocher, et surtout sa base est non plus plate, mais hémisphérique, afin d'assurer un bon contact. Lors d'un choc, une telle toupie s'inclinera beaucoup moins et sera bien plus stable.

En revanche, la base large d'une toupie de défense est source de frottements. Cette toupie tournera donc moins longtemps qu'une toupie d'endurance. On aura alors la tentation de choisir une toupie d'équilibre, censée présenter à un moindre degré toutes les qualités des trois autres. Il reste cependant douteux que ces appréciations de physiciens soient les critères retenus par les enfants pour choisir des toupies aux noms aussi évocateurs que *Big Bang*, *Pegasus* ou *Diablo Nemesis* !

Toutes les ARCHIVES

- Pour la Science
- Dossier Pour la Science

depuis

1996



maintenant disponibles sur www.pourlascience.fr

* Numéros à lire en ligne ou téléchargeables en PDF, en vente à l'unité ou accessibles par abonnement.

QUESTION AUX EXPERTS

Peut-on échapper à la pollution en ville ?

Oui, en partie ! La pollution de l'air y est très hétérogène et certains endroits sont (un peu) préservés.

Isabelle COLL



Un rapport de l'Agence européenne pour l'environnement estime qu'en Europe, près de 95 % de la population urbaine est exposée à des concentrations de particules fines excédant les recommandations de l'OMS, et susceptibles à long terme de déclencher des maladies respiratoires et des cancers. En outre, un rapport du Sénat publié en 2011 indique que la concentration de dioxyde d'azote (NO_2), un gaz nocif pour les voies respiratoires, dépasse le maximum autorisé dans toutes les grandes agglomérations françaises. Dans les zones urbaines denses, ces composés constituent les deux principaux polluants atmosphériques dangereux pour la santé. Peut-on y échapper ?

Dans les régions urbanisées, les transports sont responsables de près de 60 % – et jusqu'à 80 % localement d'après le Sénat – des émissions d'oxydes d'azote (NO et NO_2), et de plus d'un quart des émissions de particules fines. Le reste des émissions provient des secteurs industriel, résidentiel, tertiaire et agricole, selon les données d'Airparif pour la région Ile-de-France. La concentration de polluant dépend de la densité des émetteurs, mais aussi de l'efficacité de la dilution dans l'atmosphère – elle-même fonction de divers paramètres, tels que la force du vent.

Les centres-villes sont à éviter – du moins ceux où la circulation et l'activité commerciale sont denses –, car leur compacité défavorise la dispersion des polluants. En outre, on y est exposé aux bouffées d'émissions de solvants

ou de graisses issues de certains commerces (garages, pressings, etc.) et aux particules provenant de la cuisson des aliments.

Il est aussi conseillé de s'éloigner de la circulation. Au centre d'un carrefour à sens giratoire fréquenté, la concentration de polluants peut être supérieure de plus de 30 % par rapport à la périphérie. Quand l'espace environnant est dégagé, l'influence du trafic s'étend sur plus de 100 mètres. La concentration de polluants est *a minima* doublée dans l'habitacle des voitures, peu ventilé. La position des ventilations, à hauteur des pots d'échappement des véhicules environnants, contribue à y dégrader la qualité de l'air.

Endroits confinés, danger

De façon générale, les milieux confinés sont à éviter. Dans les parkings couverts, les voitures polluent même à l'arrêt, car les carburants s'évaporent légèrement. Selon une étude de l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (AFSSET) réalisée en 2007, la mauvaise qualité de l'air y entraîne un risque pour la santé des usagers et surtout des professionnels. Aux heures d'arrivée et de départ du bureau, la concentration des polluants y est multipliée par 10 à 100 par rapport au niveau urbain moyen.

Dans le réseau souterrain du métro, les gaz polluants sont aussi concentrés que dans l'environnement extérieur immédiat, d'où ils rentrent par les ventilations et les prises d'air. En revanche, les particules y atteignent des

concentrations élevées, comparables à celles mesurées à proximité du trafic. Entre un tiers et la moitié d'entre elles proviennent de sources internes (frottements sur les rails, etc.).

Est-on protégé chez soi ? Pas complètement, selon une étude d'Airparif réalisée en 2004, car l'air circule bien entre l'extérieur et l'intérieur d'un bâtiment. Les concentrations d'oxydes d'azotes sont en moyenne 20 % supérieures dans un logement quand il est exposé à un grand axe routier. En outre, il existe des sources internes de polluants.

Habiter en hauteur permet tout de même d'échapper (un peu) aux polluants automobiles, dont les concentrations sont presque toujours plus élevées près du sol. Les rares mesures font état de 20 % à 50 % de réduction des concentrations entre le sol et le troisième ou le cinquième étage. Les arbres bordant les rues peuvent freiner le transfert des polluants vers le haut des immeubles, mais ils accroissent l'exposition des piétons.

Le meilleur refuge pourrait alors se situer dans les grands espaces verts urbains. On y est en retrait des sources d'émission et le transport des polluants est limité par les arbres. En outre, de nombreux polluants se fixent sur ces derniers. Au centre du parc Montsouris, à Paris, les concentrations moyennes de dioxyde d'azote sont jusqu'à deux fois inférieures à celles mesurées sur la plupart des voies urbaines. ■

Isabelle COLL est maître de conférences à l'Université Paris-Est Créteil.

SciLogs

La nouvelle communauté de blogueurs scientifiques francophones

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

Complexités

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

Signal sur bruit

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

Best of Bestioles

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

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



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



Suivez les dernières actualités
des blogueurs également
sur les réseaux sociaux

Proposé par **POUR LA SCIENCE**

SCIENCE & GASTRONOMIE

Aubergines en osmose

Le sel fait dégorger les légumes par osmose : une partie de l'eau du végétal est évacuée, ce qui empêche l'huile de pénétrer et de la remplacer lors de la friture.

Hervé THIS



Nous avons examiné le mois dernier des questions d'imbibition par de l'huile, sous l'effet de la capillarité. D'autres phénomènes doivent-ils rester présents à l'esprit si nous voulons bien cuisiner ?

J'en propose 14 : (1) le sel se dissout dans l'eau ; (2) le sel ne se dissout pas dans l'huile ; (3) l'huile ne se dissout pas dans l'eau ; (4) l'eau s'évapore à toute température, mais elle bout à 100 °C ; (5) le plus souvent, les aliments sont faits principalement d'eau (ou d'un autre fluide) ; (6) les aliments sans eau ni autre fluide sont durs ; (7) certaines protéines (dans les œufs, la viande, le poisson) coagulent ; (8) le tissu collagénique se dissout dans l'eau quand la température dépasse 55 °C ; (9) les aliments sont des systèmes dispersés ; (10) certaines réactions (de Maillard, des oxydations, des caramélisations, des pyrolyses, etc.) engendrent des composés nouveaux ; (11) quand une préparation blanchit, c'est souvent qu'il y a foisonnement ou émulsion ; (12) les composés migrent par diffusion ; (13) la capillarité fait migrer les liquides ; (14) l'osmose a lieu quand des liquides de concentrations différentes sont séparés par une membrane appropriée.

C'est le dernier phénomène, l'osmose, qui nous retiendra ici, parce qu'il est la clé de la cuisson des aubergines, légumes pleins d'eau, ou d'huile quand l'eau a été évaporée dans une friture et que l'huile a pris sa place.

Les cuisiniers font souvent « dégorger » les végétaux en les coupant et les saupoudrant de sel. L'eau sort de l'aliment et dissout le sel, tandis que le tissu végétal durcit. Pourquoi ?

En première approximation, les tissus végétaux sont faits d'une partie de « parenchyme », avec des cellules jointoyées par la paroi cellulaire, constituée de cellulose et de pectines, et d'une partie de tissu conducteur – des « tuyaux » qui montent la sève brute (eau et sels minéraux dissous, surtout) vers les feuilles, ou qui redescendent la sève élaborée (eau, saccharides, acides aminés...) vers le tissu de structure ou les structures de stockage.

Quand on place un végétal au contact du sel, de l'eau en sort, mais d'où précisément ? L'analyse de l'eau de macération d'un tissu végétal révèle des saccharides et des acides aminés. Des échanges par simple diffusion moléculaire s'effectuent donc entre le liquide qui emplit les canaux et le sel, et d'autres échanges s'effectuent par osmose entre l'intérieur et l'extérieur des cellules parenchymateuses.

On entend souvent dire que, le sel ne pouvant traverser les membranes cellulaires, l'eau sort du compartiment le moins concentré en sel vers le compartiment le plus concentré, « afin » de dissoudre le sel et d'égaliser les concentrations. Une telle description est téléologique et fautive. L'eau et le sel n'ont pas d'intention, et les mouvements des molécules ne s'effectuent pas « afin » de dissoudre les sels ; par ailleurs, dans le phénomène d'osmose, les molécules d'eau diffusent dans les deux sens, et c'est la plus forte affinité de l'eau pour le sel qui conduit à un mouvement global de l'eau.

Finalement, comment dégorger au mieux les aubergines et autres denrées ?

La pression osmotique qui entraîne le mouvement de l'eau est proportionnelle à la température absolue et à la différence des concentrations. D'où deux moyens de commande, d'une part la température, et d'autre part la concentration saline. Cette dernière doit rester très élevée si l'on veut une osmose rapide, qui risque alors de créer une sorte de croûte, à travers laquelle les échanges se font ensuite plus lentement. Pour l'aubergine et la courgette, par exemple, les courbes de dégorgement font apparaître deux régimes, l'un rapide, pendant une heure et quart, et l'autre plus lent, ensuite.

Pour des dés de navets, de carottes, de pommes ou de poires, on obtient des morceaux croquants bienvenus et, pour de l'aubergine, l'absorption d'huile est réduite (plusieurs grammes d'huile en moins pour 50 grammes de tissu) quand les tissus végétaux sont dégorgés – un gros avantage diététique.

N'oublions pas l'osmose quand nous sommes devant les fourneaux !



Hervé THIS, physico-chimiste, est directeur du Centre international de gastronomie moléculaire AgroParisTech-INRA et directeur scientifique de la Fondation Science & culture alimentaire (Académie des sciences).



Retrouvez la rubrique Science & gastronomie sur www.pourlascience.fr

MATHÉMATIQUES

La maison des mathématiques

Cédric Villani, Jean-Philippe Uzan et Vincent Moncorgé

Le Cherche Midi, 2014
(144 pages, 25 euros).

Le livre est une peinture de l'activité des mathématiciens à travers divers témoignages où dominent les réflexions de Cédric Villani et de Jean-Philippe Uzan, et les photographies, non verbalisées mais éloquentes, de Vincent Moncorgé.

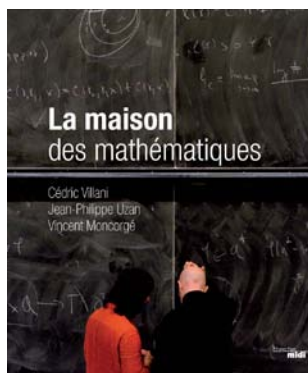
Terre d'accueil pour les mathématiciens, l'Institut Henri Poincaré à Paris évoque ce Victor Hugo des mathématiques que fut Henri Poincaré, un héros du grand public trop oublié. Faire revivre son nom par les activités de l'institut, c'est participer à une fête mathématique et philosophique inspirée.

La maison des mathématiques nous donne un aperçu vivifiant de la façon dont les mathématiciens vivent et travaillent, quand ils pénètrent à l'intérieur d'eux-mêmes pour s'interroger sur leur compréhension des structures de leurs pensées, et quand ils échangent leurs visions avec leurs collègues dans une fierté assumée de l'art pour l'art.

Grâce à ce livre, nous entrevoyons la nature des échanges associatifs entre mathématiciens, faits de gestes œcuméniques, de schémas révélant une architecture de raisonnement et, surtout, de symboles, condensés de pensées. L'activité du mathématicien quand il explore les propriétés de formules déjà connues est (je cite librement C. Villani) comparable à la création du poète qui fouille inlassablement les différentes significations des mots. Les mathématiciens conversent au tableau noir, les photos en témoignent, car l'instrument autorise une sponta-

néité dans l'exposé et des libertés interdites par la rédaction.

C. Villani a une écriture simple et claire qui ne l'empêche pas d'être juste, émouvant et éventuellement franc dans ses critiques.



J.-Ph. Uzan examine la beauté des mathématiques, un art du monde des idées qui ne fait pas appel aux cinq sens, mais à la seule logique structurante. Il disserte sur un sujet passionnant que nous dénommerons le paradoxe du joueur de pétanque: celui-ci lance sa boule avec un jugement dicté par sa mémoire musculaire sans se préoccuper des lois de Newton qui, pourtant, régissent le comportement de la boule. J.-Ph. Uzan nous fait entrevoir pourquoi les mathématiques sont déraisonnablement efficaces en physique, où la complexité des systèmes est réduite, et déraisonnablement inefficaces en biologie, dans les sciences humaines et à la pétanque, disciplines où jouent de multiples paramètres aux rétroactions multiples qui ne se laissent pas enfermer dans une équation de taille réduite. Un raisonnement mathématique est juste et éternel, mais il ne dévoile qu'une vérité partielle, a écrit Alain Connes.

Ces considérations sont la quintessence d'une longue réflexion des auteurs et une incitation à visiter cette Abbaye de Thélème mathématique qu'est

l'institut Henri Poincaré inauguré en 1928. Heureux temps où les mécènes comme la Fondation Rockefeller subventionnaient des lieux d'activité scientifique; aujourd'hui, les riches entrepreneurs investissent dans des constructions « distinguées ».

Philippe Boulanger

PRIMATOLOGIE

Les chimpanzés des Monts de la Lune

Sabrina et Jean-Michel Krief

Belin et Éditions du MNHN, 2014
(288 pages, 30 euros).

Quel régal que cet ouvrage! Sabrina et Jean-Michel Krief, jeunes étudiants ivres d'Afrique, allient leurs aspirations professionnelles et rêves d'aventures. Tout commence par leur impatience dans les amphithéâtres, Sabrina à l'École vétérinaire d'Alfort et Jean-Michel en médecine. Après un premier voyage au Kenya, ils sont vite conscients que les safaris en minibus correspondent mal à leur vision de la faune sauvage; ils s'organisent pour financer au fil des ans voyages initiatiques et scientifiques sur la piste des grands singes. Jean-Michel abandonne le stéthoscope au profit du téléobjectif et devient le témoin de leurs pérégrinations.

Puis Sabrina décide de se consacrer aux chimpanzés orphelins d'une association congolaise et obtient son DEA (Master 2) sur la base de ses premières observations de terrain. La pertinence de ses résultats, son intuition et sa rigueur ouvrent la porte à de nouvelles hypothèses scientifiques. Les comportements alimentaires des chimpanzés réintroduits dans la nature sont surprenants, comme cette coprophagie qui alerte les

primatologues, inquiets d'y voir une forme de mal-être chez les orphelins. Mais l'examen des selles et la récolte des fruits consommés permettent de comprendre que le passage par le tube digestif a transformé des graines indigestes en ressources protéiques précieuses, d'où la récupération fécale observée. La démonstration scientifique sera complétée par l'observation de ce comportement chez les chimpanzés sauvages de Kanyawara en Ouganda.

Sabrina se spécialise dans l'étude du régime alimentaire des grands singes et constate que certaines plantes semblent consommées pour des vertus autres que leur appétence... Elle découvre que les chimpanzés orientent leurs ingestions en fonction de leur état de santé et des ressources disponibles. La notion d'automédication apparaît: écorces pour se débarrasser de douloureux parasites digestifs, poignées de terre pour soulager des aigreurs d'estomac,



feutilles contre le paludisme... La thématique de recherche se précisant, des financements de thèse sont trouvés, et Sabrina s'engage dans une carrière rêvée au Muséum. Jean-Michel est là pour immortaliser chaque découverte au cœur de la jungle et nous faire partager les émotions, les joies et les épreuves traversées. Les comportements méconnus et furtifs des chimpanzés prennent vie et crédit entre les

notes de la primatologue et les cli-
chés de leur intimité. On assiste le
ventre noué à une chasse au colobe
dont la troupe de chimpanzés se
partagera les viscères selon une
stricte hiérarchie sociale.

Après la pharmacopée des
grands singes, les auteurs se
lancent vers un nouveau défi
dans la forêt de Sebitoli pour
habituer une nouvelle commu-
nauté de chimpanzés. Et de se
poser la question de cette inter-
action homme - grands singes,
dont il faut comprendre tous les
impacts pour espérer pouvoir
encore agir et éviter la dispari-
tion des chimpanzés.

Fanélie Wanert
Centre de primatologie
de l'Université de Strasbourg

PHILOSOPHIE

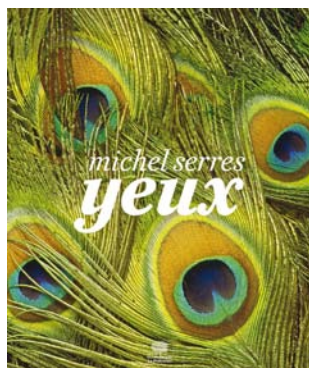
Yeux

Michel Serres

Le Pommier, 2014
(192 pages, 39 euros).

Aristote disait que «l'âme ne
pense jamais sans images». Ce très beau et grand livre
est une réflexion du philosophe
Michel Serres sur la lumière. Le
livre traite du lien entre l'homme
et son environnement à travers
des objets, des peintures et des
photographies. Pour M. Serres,
«la plupart des choses renvoient
la lumière tout autant qu'elles la
reçoivent, la piègent et la traitent;
l'imagine qu'elles voient tout
autant qu'elles sont vues... bien
sûr, chacun voit à sa manière». Tel est le thème central de ce livre
merveilleusement illustré.

En tournant les pages, on ne
sait jamais ce que l'auteur nous
prépare. On est même parfois
dérouté par la mise en pages, sans
doute voulue, en symbiose avec
l'imagination de M. Serres. Au



cours de ce voyage dans le monde
de l'image, il jette son regard sur du
déjà-vu. La peinture y est toujours
présente, car elle offre le contraste
lumineux nécessaire à l'harmonie
des couleurs. Le peintre essaie de
donner à voir ce que les yeux ne
voient pas. Nous devons même
«entrer dans le noir pour mieux
y voir». Les puits, les grottes, les
tunnels et les cavernes fascinent
M. Serres. «Parce que la lumière
naît de l'ombre, l'obscurité change
notre façon de voir. On peut ainsi
revisiter l'origine de la vision».

Les tableaux, le trajet des
rayons solaires, l'œil du cyclone
ou de la mouche, le paon qui voit
tout avec la multitude d'yeux sur
son plumage, les fables de La Fon-
taine, les couleurs de l'été indien
au Québec, permettent d'illustrer
magistralement ses propos
philosophiques. On y apprend
des termes tels que *panoptique* ou
ocelles. Il ne parle pas cependant
des yeux qui servent, à l'avant des
bateaux du delta du Mékong ou
sur les portes en Haute Égypte,
à repousser les mauvais esprits.
Pourquoi ne se pose-t-il pas
aussi la question fondamentale
à laquelle même le physiologiste ne
sait répondre : pour quelle raison
l'œil «lance-t-il ses neurones à
travers le volume entier du cer-
veau» pour créer les images en
arrière de celui-ci ?

L'écriture de M. Serres nous
donne l'impression de le voir

parler. Le livre se termine par
une réflexion à connotation reli-
gieuse «feu d'yeux, feu de dieu».
Un beau livre à offrir pour Noël.

William Rostène
Institut de la vision, Paris

BOTANIQUE

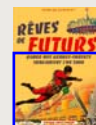
Une histoire des fleurs

Valérie Chansigaud

Delachaux & Niestlé, 2014
(240 pages, 34,90 euros).

Prenant le parti d'adopter le
point de vue des fleurs elles-
mêmes, l'auteur façonne
dans cet ouvrage une passionnante
histoire culturelle. Elle propose
au lecteur un voyage à travers les
siècles, fait d'allers-retours entre
nature et pratiques culturelles.

jardinier, naturaliste, spécula-
teur... l'homme s'est mis en quête
de trouver parmi les fleurs les figu-
rantes de la beauté, du bonheur,
de la paix et de l'abondance. Il n'a
de cesse d'osciller, entre artiste et
démurge, de la collection à la créa-
tion, alliant savoirs botaniques et
représentations allégoriques. De
la forêt au jardin et de la serre à
la ville, sauvage ou transformée,
la fleur est partout complice des
événements intimes et publics de
chacun, et en traçant son histoire,
c'est la nôtre que V. Chansigaud
dessine. Avec la succession des
modes, l'amour des fleurs évolue
d'une variété à l'autre, d'un usage
au suivant, allant jusqu'à mettre en



Rêves de futurs

N. Carletet

Éditions Ouest-France, 2014
(168 pages, 21 euros).

Avec la révolution industrielle du XIX^e siècle,
la vie quotidienne de la société occidentale
change en profondeur. C'est le temps des
inventions et de la science qui doivent amé-
liorer la vie de tous les jours. Cet ouvrage,
richement illustré, nous propose de voir
comment des écrivains et des artistes, tels
Jules Verne ou Albert Robida, imaginaient
le futur et en particulier l'an 2000. C'est
toujours avec une certaine malice que l'on
voit les promesses qu'inspirait l'avenir :
des utopies de villes aériennes jamais
construites aux systèmes de visioconférence
qui ont bien vu le jour.



C3RV34U

S. Dehaene (sous la dir.)

La Martinière, 2014
(216 pages, 32 euros).

À l'occasion de l'inauguration de la nouvelle
exposition permanente C3RV34U à la Cité
des sciences et de l'industrie, à Paris, un bel
ouvrage a été conçu pour nous accompa-
gner dans les méandres du cerveau. Une
quinzaine de spécialistes s'associent pour
expliquer avec clarté le fonctionnement des
neurones, la dyslexie, les illusions d'optique...
quelques-unes des multiples facettes du
cerveau, cet organe si complexe. Une place
importante est faite à l'image et permet une
belle rencontre entre l'art et les techniques
d'imagerie cérébrale les plus modernes.



Nouvelle-Zélande

A. Guérin

Glénat, 2014
(160 pages, 39,50 euros).

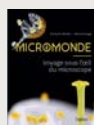
Dès la couverture, vous savez que vous
partez vers l'un des plus extraordinaires
pays de la Terre. L'auteur, photographe
et géologue, vous invite à découvrir un
archipel où les volcans de la ceinture de
feu du Pacifique, les forêts tempérées
et les glaciers se côtoient. Il montre des
paysages à couper le souffle. La Nouvelle-
Zélande est aussi un archipel à la faune et
à la flore uniques ; le gorfou du Fiordland
et les fougères directement issues des
forêts de la Pangée vous prouvent que
vous êtes bien à l'autre bout du monde.



Vins de feu

Charles Frankel
Dunod, 2014
(240 pages, 24,50 euros)

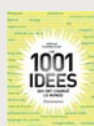
Les terroirs reflètent le feu qui les créa, notamment dans leurs vins. L'Etna entre vignes et agrumes, les vignes du Vésuve, celles des côtes d'Auvergne... Géologue et amateur de vin, l'auteur a fait de ses deux passions le principe de la promenade géologique agrémentée d'images magnifiques à laquelle il nous convie de cave en cave. En chemin, il nous raconte les histoires des cépages aperçus dans les vignes, celles de leurs vignerons, ainsi que celles des monstres volcaniques qui les font vivre.



Micromonde

Hervé Conge et François Michel
Belin, 2014
(192 pages, 23 euros)

Nous faire voyager dans le monde microscopique et nous initier aux beautés du monde vivant et minéral, c'est ce que réussit à faire cet ouvrage. Les textes, relativement courts et de lecture agréable, instruisent sans douleur, tandis que les abondantes photographies en couleurs ravissent les yeux. Les clichés pris au microscope, souvent très beaux, révèlent des architectures qui ne cessent de nous étonner. Des sores de fougères à la fécondation chez les algues, des vorticelles dans une goutte d'eau aux trachées des insectes, de la structure intime des roches aux minuscules cristaux de sel : une excursion dans un monde fascinant, à la portée de tous.



1001 idées qui ont changé le monde

Flammarion, 2014
(960 pages, 35 euros)

Nous innovons, seuls ou en groupe, sans nous en rendre compte et sans réaliser que nous partageons aussitôt nos idées. Bien entendu, il y a aussi les innovations des inventeurs et des savants. Toutes ces idées font et changent le monde. C'est ce qu'illustre ce livre, beau recueil de petits articles illustrés classés chronologiquement, rappelant les innovations et racontant l'essentiel de leurs histoires. Cette véritable foire aux idées va du *Discours sur la dignité humaine* au tableau périodique des éléments en passant par *L'État islamique*, le Bauhaus, les fractales et l'équation de Drake !

péril ou faire disparaître l'objet du désir à force de prélèvement ou par l'introduction d'espèces invasives.

Ce livre, riche de superbes illustrations et au style ouvert au plus large public, aborde transversalement ce que les fleurs, des mauvaises herbes aux plantes aimables et précieuses, révèlent de notre pratique sociale de la nature. Il éveille la curiosité au moyen de 12 questions aussi singulières que « Y avait-il des fleurs au paradis terrestre ? », « Les fleurs rendent-elles heureux ? » ou encore « Y aurait-il encore des fleurs demain ? », auxquelles il répond de manière simple, mais précise et documentée.

Plus gravement, V. Chansigaud évoque la *plant blindness* (non-perception des plantes), cette aptitude à ne plus voir ces fleurs omniprésentes, à rester ignorant et indifférent face à ces êtres vivants, voire à leur dénier cette qualité. Aussi, dans les derniers chapitres, elle redonne de la valeur aux mauvaises herbes et aux fleurs ordinaires, et s'alarme face à l'appauvrissement de la biodiversité végétale et à la menace des changements climatiques. Elle déplore enfin l'inculture des plantes et la désaffection pour l'enseignement de la botanique, et se demande « comment sauvegarder quelque chose que l'on n'est pas en mesure de nommer ni même de voir ? »

Josquin Debaz
GSPR, EHESS, Paris

■ ASTRONOMIE-HISTOIRE DE L'ART

L'astronomie dans l'art

Alexis Drahos
Citadelles & Mazenod, 2014
(196 pages, 59 euros)

Une œuvre continue ! Après sa thèse en histoire de l'art sur les théories scienti-

fiques et la peinture de paysage au XIX^e siècle, soutenue en 2010, Alexis Drahos nous a livré un premier « beau livre » intitulé *Orages et tempêtes, volcans et glaciers, les peintres et les sciences de la Terre aux XVIII^e et XIX^e* (Hazan, 2014).

Son second opus est consacré à la science des astres et organisé en cinq étapes : Renaissance, révolution galiléenne, Lumières, XIX^e puis XX^e siècle.

L'ouvrage, magnifiquement illustré, nous donne à voir deux types d'œuvres. Il y a, d'une part, une iconographie à caractère proprement scientifique, comme les études sur la lumière cendrée de Léonard de Vinci dans le Codex Leicester (1508-1512) ou les dessins de l'éclipse totale de Soleil de Trouvelot (1878) ; d'autre part, des peintures inspirées par l'astronomie, qui forment l'essentiel du corpus étudié.

Pour ces dernières, A. Drahos a le dessein de montrer les liens qui se tissent entre artistes et savants, notamment à partir de Galilée. Les comparaisons qu'il propose se révèlent très éclairantes. Ainsi, *L'immaculée conception* de Cigoli (1610-1612), ami de Galilée, repose sur une lune « grêlée de cratères » proche des dessins lunaires réalisés par Galilée lui-même, tandis que, sur le même thème et à la même époque, la vierge de Velasquez (1618) a les pieds sur une Lune sans l'ombre d'une tache, selon la vision aristotélicienne soutenue par l'Église.

Chacune des périodes offre l'occasion à A. Drahos de décrire les enjeux de l'astronomie du moment et leurs traces sur l'art – parenté encore étroite avec l-as-



tronomie à la Renaissance, primat de l'observation avec l'apparition de la lunette, engouement des gens du monde puis du grand public aux XVIII^e et XIX^e siècles, technologie triomphante mais aussi retour vers le rêve à l'époque contemporaine.

Naturellement, certaines œuvres sont des incontournables d'un tel ouvrage et nous ne nous étonnons pas d'y trouver la comète de Giotto (visible dans l'œuvre dite de *L'adoration des mages*) ou *La Nuit étoilée* de Van Gogh. Mais l'intérêt réside principalement dans la découverte d'œuvres bien moins célèbres et dans leur fine analyse. Chaque chapitre m'a réservé d'agréables surprises, de *La Grande Comète au-dessus de Prague* de Jiri Daschitzsky (1577) aux œuvres contemporaines de Thomas Ruff.

À la fin du XIX^e siècle, on offrait *L'Astronomie populaire* de Flammarion en livre d'étrennes. Noël et le jour de l'an approchent en ce début de XXI^e siècle. Pourquoi ne pas renouer avec la tradition et offrir du rêve étoilé avec *L'astronomie dans l'art* ?

Colette Le Lay
Centre François Viète,
Université de Nantes

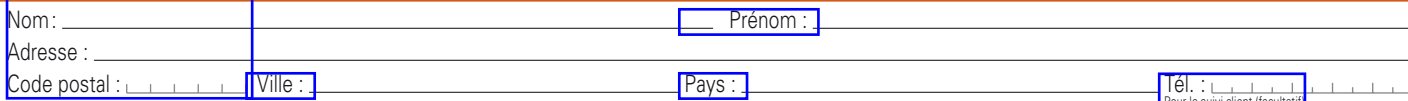
Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur www.pourlascience.fr





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

A réception de votre bulletin, comptez 5 semaines pour recevoir votre n° d'abonné. Passé ce délai, merci d'en faire la demande à abonnements@pourlascience.fr



*Pour la France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'Europe (pays de la zone SEPA) : 7,66€ par mois. Abonnement en reconduction tacite dénonçable à tout moment auprès du service abonnement. Conditions complètes sur www.pourlascience.fr

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire.

PHILONÉISME OU NÉOPHILIE ?

Quand deux termes français ont le même sens étymologique, mais diffèrent par l'usage, l'un, en général, est savant et d'origine grecque ; l'autre, usuel, d'origine latine. Ainsi, polychrome/multicolore, antagonisme/opposition. Mais il arrive que les deux termes viennent du latin : égotant/maladif. Il arrive aussi que, les français étant en fait une réunion d'idiomes, trois termes savants, venus du grec, désignent une même profession : logopède (en Belgique), logopédiste (en Suisse), orthophoniste (en France et au Québec).

Le couple misonéisme/néophobie est une exception d'un autre genre. Les deux termes sont savants, formés sur des racines grecques, et leur concurrence ne relève pas de variations régionales. Laissons aux puristes le distinguo entre la haine du nouveau (misonéisme) et la crainte du nouveau (néophobie). Les deux termes sont employés comme synonymes, et stigmatisent l'hostilité systématique à tout ce qui est nouveau.

Pourquoi n'existe-t-il pas de terme usuel ayant ce sens ? Hasardons une réponse. L'attitude spontanée d'une société est de s'attacher à ce qui est pour la seule raison que c'est. Elle perpétue les coutumes, pratiques, croyances, institutions, etc., qu'elle a « toujours connues » : y renoncer serait faire fi de la sagesse des ancêtres qui les ont instaurées, et mettrait en danger la stabilité de la société. Le rejet du nouveau étant normal, il n'y a pas de raison d'inventer un terme pour le condamner.

On objectera que, ici et maintenant, ce rejet, au contraire, est rare. C'est que notre société est exceptionnelle. Valoriser par principe le nouveau est une originalité de

sa part. Cette attitude n'est pas spontanée, et s'est répandue sous l'impulsion de la science et de la technique. Ainsi, elle n'est pas d'origine populaire, mais savante. Sans doute est-ce pour cela qu'aucun terme usuel ne fustige ceux qui rechignent au nouveau.

MESURER LA DÉMESURE

L'exploration directe des confins du Système solaire n'est pas à la portée des hommes. « Un rayon lumineux parti du Soleil met plus de quatre heures pour atteindre Neptune. Le Système solaire n'est pas à échelle humaine » (Christian Magnan, *Théorème du jardin*, amds-édition, 2014).



L'Univers est encore moins à échelle humaine, avec ses 14 milliards d'années d'âge. Pourtant, les évaluations de ces distances et de ces durées sont œuvre humaine. Il y a là sinon un paradoxe, du moins une difficulté à cerner le sens du mot concevoir. Par exemple, nous concevons qu'une heure est plus longue que trois minutes, et en avons l'expérience. Nous n'avons vécu aucune expérience du fait que 14 milliards d'années durent plus longtemps que 6 000 ans. Les nombres 6 000 et 14 milliards sont des constructions humaines mesurant des durées hors de portée humaine. Néanmoins, nous concevons la différence entre elles. Au point que nous nous divisons à leur sujet : les tenants d'une interprétation littérale de la Bible, pour lesquels l'Univers a 6 000 ans, s'opposent à la science, pour laquelle il a 14 milliards d'années.

Que l'homme, être fini, soit capable de concevoir l'infini étonnait les penseurs du

XVII^e siècle. Que l'homme soit capable de mesurer des objets qui ne sont pas à sa mesure n'est pas moins étonnant.

VERTIGE PASCALIEN

Si le nez de Cléopâtre avait été plus court, l'histoire de l'Antiquité aurait pu être bouleversée, mais nous n'avons pas le sentiment que cela aurait profondément affecté la face du monde actuel. Nous nous sentons beaucoup plus loin de l'Antiquité que Pascal.

Son vertige devant le rien qui aurait pu changer tout ne nous est pas étranger pour autant. Certains l'éprouvent en pensant que la guerre de 1914 n'a tenu qu'au hasard : si l'attentat de Sarajevo avait échoué, peut-être aurait-elle été évitée. Toutefois, d'autres esprits, plus sensibles à l'existence sous-jacente de structures causales, pensent que des mouvements profonds étaient à l'œuvre et auraient mené à une guerre tôt ou tard : l'attentat de Sarajevo n'a été que le détonateur ; il ne fut donc pas une catastrophe majeure, mais une simple circonstance.

Juger que tel ou tel événement a été important parce qu'il a eu de grandes conséquences, c'est estimer que, sans lui, l'histoire aurait été significativement différente. C'est donc la réécrire. Pourtant, on ne peut pas la réécrire : elle ne donne jamais le moyen de trancher entre les hypothèses alternatives qu'on envisage. Du coup, c'est la psychologie individuelle qui fait qu'on s'arrête à une hypothèse plus volontiers qu'à une autre et qu'on est saisi, ou non, par un vertige pascalien. ■





CARTES & DONNÉES

LA PUISSANCE DE L'ANALYSE CARTOGRAPHIQUE

« [...] une gamme d'outils performants et adaptés à **une cartographie rapide, communicante et par-delà les frontières** ! Enseignant et chercheur en Géopolitique, les produits de la gamme Cartes & Données me permettent de tirer le meilleur parti des technologies de la cartographie automatique pour faciliter l'exploitation de données électorales ou démographiques. Cartes & Données permet une cartographie rapide et intelligente [...] »

Eric Auburtin
Centre de Recherche et d'Analyses Géopolitiques, Paris 8



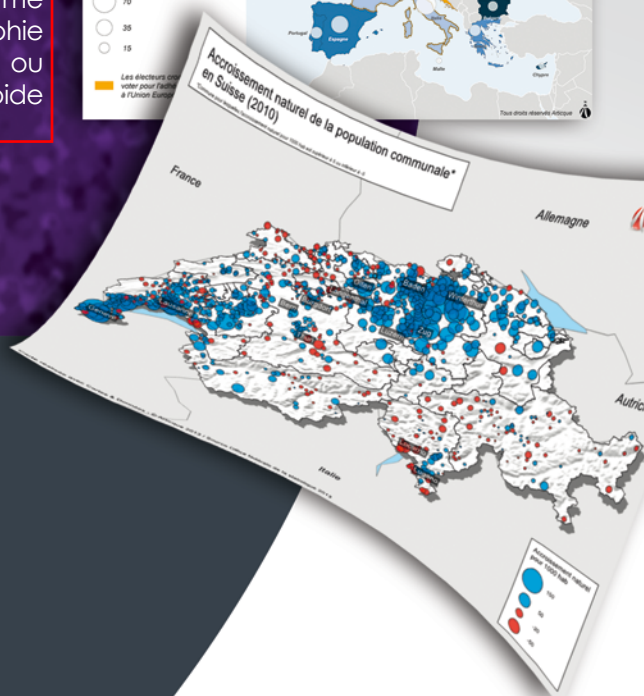
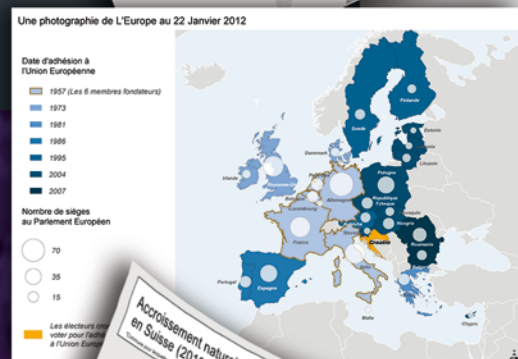
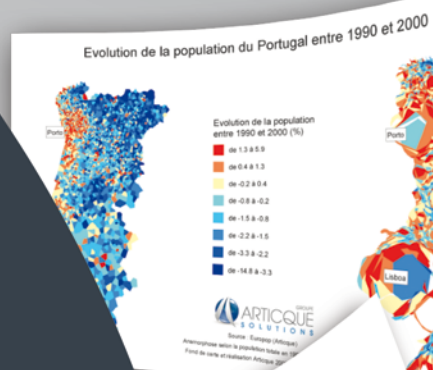
Disponible pour Windows



ritme.com/cartes-donnees

34 Bd Haussmann - 75009 Paris - France
+33 (0)1 42 46 00 42

© 2014 RITME. Cartes & Données est le logiciel de cartographie décisionnelle édité par le Groupe ARTICQUE. RITME est le distributeur officiel de Cartes & Données en France, Belgique et Luxembourg pour l'éducation et la recherche. SCIENTIFIC SOLUTIONS est le distributeur officiel de Cartes & Données en Suisse pour l'éducation et la recherche.



RITME
NOTRE MÉTIER : FACILITER LE VÔTRE



Permettre à votre épargne de faire des petits c'est aussi ça GMF.

Une épargne performante et sûre pour préparer les projets de demain. Avec les contrats d'assurance vie et les supports en euros GMF, vous vous constituez petit à petit une épargne performante qui vous permettra de financer tous vos projets d'avenir, en toute sécurité.



Catégorie contrats et fonds en euros



Rendez-vous sur www.gmf.fr
ou appelez le

N° Vert 0 800 88 11 62

APPEL GRATUIT DEPUIS UN POSTE FIXE

* 3,05%, taux servi en 2013 : frais de gestion déduits et avant prélèvements sociaux pour tous les contrats d'assurance vie en euros GMF et les supports réguliers de Multéo et de Certigo. Les performances passées ne préjugent pas des performances futures.

GMF VIE - Société anonyme au capital de 186 966 736 euros entièrement versé - Entreprise régie par le Code des assurances - 315 814 806 R.C.S. Pontoise
Siège social : 1, rue Raoul Dautry - CS 40003 - 95122 Ermont Cedex.

