POUR LA SCIENCE

PHYSICO-CHIMIE
Ruée vers les nanoparticules d'or

ÉCONOMIE
Des pyramides de Ponzi partout ?

ASTROPHYSIQUE
Le gaz galactique, berceau des étoiles

POUR LA SCIENCE

Octobre 2014 - n° 444

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

Décrypter le cerveau

Comment la science y parviendra

M 02687 - 444 - F: 6,20 € - RD

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

Notre métier facilite le vôtre

DISTRIBUTEUR EXPERT EN LOGICIELS SCIENTIFIQUES

PLANS D'EXPÉRIENCES

PUBLICATION D'ARTICLES

STATISTIQUES DÉCISIONNELLES

SUPPORT TECHNIQUE

CARTOGRAPHIE STATISTIQUE

SOURCING UNIQUE

CALCUL DE L'INGÉNIEUR

ACTUALITÉ PRODUITS

CALCUL ET SIMULATION

SUIVI DES LICENCES

ÉPIDÉMIOLOGIE

NEWSLETTER

ÉCONOMÉTRIE

ACCOMPAGNEMENT

ANALYSE DE RISQUES

RÉSEAUX SOCIAUX

RITME

NOTRE MÉTIER : FACILITER LE VÔTRE

E-DÉMO

RENCONTRES D'EXPERTS

RÉACTIVITÉ

WEBINARS

TRAVAIL COLLABORATIF

ENJEUX MULTI-CULTURELS

UNIVERS MÉTIERS

PETITS DÉJEUNERS THÉMATIQUES

ÉCHANGES

E-LEARNING

FORMATIONS INTER - INTRA

www.ritme.com

RITME
NOTRE MÉTIER : FACILITER LE VÔTRE

Votre partenaire pour tous vos logiciels scientifiques et techniques

POUR LA SCIENCE

www.pourlascience.fr

8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06

Groupe POUR LA SCIENCE
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 : Françoise Pétry
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 : Marc Artzrouni, Alain Bouquet, Silvana Condemi, Nicolas Fabas, Frédéric Gambino, Eitan Haddok, Evelyne Host-Platret, Christophe Pichon

PUBLICITÉ France
Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin
(jf.guillotin@pourlascience.fr), assisté de Nada Mellouk-Raja
Tél. : 01 55 42 84 28 ou 01 55 42 84 97 • Fax : 01 43 25 18 29

SERVICE ABONNEMENTS
Ginette Bouffaré. Tél. : 01 55 42 84 04
Espace abonnements :
http://tinyurl.com/abonnements-pourlascience
Adresse e-mail : abonnements@pourlascience.fr
Service des abonnements - 8 rue Férou - 75278 Paris cedex 06

Commande de livres ou de magazines :
Pour la Science - 628 Avenue du Grain d'Or 41350 Vineuil

DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE
Contact kiosques : À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet
Tel : 04 88 15 12 41
Information/modification de service/réassort :
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. Editors : Fred Guterl, Ricky Rusting, Philip Yam, Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong. President : Steven Inchcoombe. Executive Vice President : Michael Florek.

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

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

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

OJD PRESSE PAYANTE Diffusion Certifiée 2013

Maurice Mashaal
rédacteur en chef

Le siècle du cerveau

Pas plus gros qu'une tête d'épingle, le système nerveux d'un moustique compte quelques dizaines de milliers de neurones au plus. De quoi forcer l'admiration, car l'insecte est capable de comportements étonnamment complexes : détecter à distance une source de nourriture, se reproduire, échapper aux prédateurs, se réfugier et patienter dans un coin obscur après une tentative ratée de nous piquer... Comment un nombre aussi modeste de neurones commande-t-il tout cela ?

En fait, malgré des décennies de recherches, nous l'ignorons, ou presque. Le mystère n'est pas moindre, bien au contraire, dans le cas de l'espèce humaine. Malgré les progrès des neurosciences, nous ne savons pas, ou si peu, comment le cerveau humain et ses quelque 86 milliards de neurones engendrent nos comportements, nos perceptions, nos émotions, nos souvenirs, nos pensées.

Suivre neurone par neurone l'activité de circuits cérébraux entiers

Pourtant, les scientifiques ont bon espoir de comprendre d'ici la fin du siècle le fonctionnement du cerveau. Plusieurs grands projets ont été récemment lancés, tels le *Human Brain Project* européen visant à simuler le fonctionnement d'un cerveau humain ou le projet *Human Connectome* axé sur la cartographie des connexions neuronales. Les avancées exigeront aussi de nouveaux outils d'étude. Comme le soutiennent Rafael Yuste et George Church, deux des promoteurs du projet américain BRAIN, la mise au point de techniques permettant de suivre ou de contrôler l'activité de réseaux cérébraux entiers, neurone par neurone, sera indispensable *(voir pages 22 à 30)*.

Ces techniques, certaines en gestation, d'autres plus futuristes, aideront à décrypter le cerveau. Elles et les grands projets suffiront-ils pour élucider le phénomène de la conscience, grande énigme existentielle s'il en est ? Le pari est ici plus risqué, tant est grand le fossé épistémologique qui sépare la matière de l'esprit. ■

sommaire

1 Edito

Actualités

4 La boucherie néandertalienne de Quincieux

5 Bisphénol A et intolérance alimentaire

6 Les médailles Fields 2014

9 Un amas de galaxies cartographié avec une précision inégalée

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

12 Point de vue
Fièvre d'Ebola : une épidémie déroutante
Jean-Claude Manuguerra

14 Entretien
Gaz de schiste : pourra-t-on les exploiter proprement ?
Gilles Pijaudier-Cabot

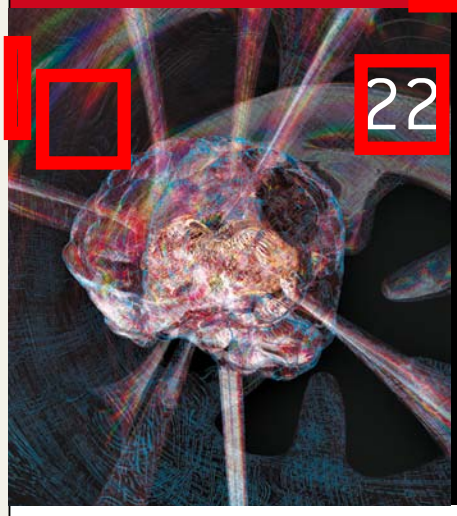
18 Lu sur SciLogs.fr
La gravité artificielle vue par le cinéma
Richard Taillet

19 Homo sapiens informaticus
Le vainqueur, un colosse aux pieds d'argile
Gilles Dowek

21 Cabinet de curiosités sociologiques
Qui marche sur la Lune ?
Gérald Bronner

Ce numéro comporte un encart d'abonnement *Pour la Science* situé en pages intérieures sur la totalité du tirage.
1re couverture : © Hobbit/shutterstock.com

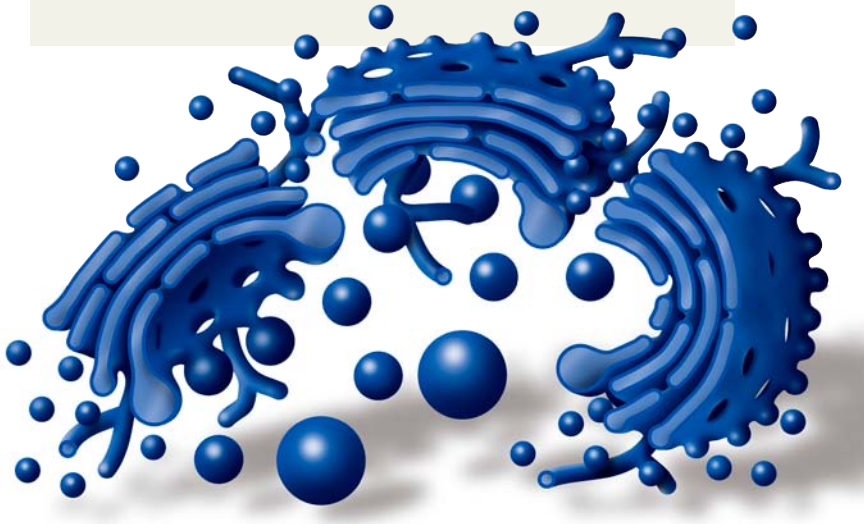
À LA UNE



22 NEUROSCIENCES
Décrypter le cerveau
Les outils du XXIe siècle
Rafael Yuste et George Church
Comment le cerveau produit-il nos pensées et nos émotions ? Pour le comprendre, les scientifiques devront disposer d'outils permettant de scruter l'activité des circuits cérébraux neurone par neurone.

32 PHYSICO-CHIMIE
La ruée vers le nano-or
Delphine Schaming, Olivier Pluchery et Hynd Remita
Quand l'or prend la forme de particules nanométriques, ses propriétés physico-chimiques et sa couleur changent. Ces nanoparticules sont promises à de nombreuses applications, notamment dans le traitement des cancers.

41 NOBEL 2013 Du trafic dans les cellules
Récit d'une découverte
En 2013, James Rothman, Randy Schekman et Thomas Südhof ont reçu le prix Nobel pour leurs travaux sur le transport des protéines et des lipides dans les cellules. Ils nous racontent leurs découvertes.
Et maintenant ?
Communication neuronale, sécrétion hormonale, réponse immunitaire... Les découvertes récompensées ont des implications dans de nombreux domaines.



48 ASTROPHYSIQUE

Du gaz galactique aux étoiles

Clare Dobbs

Comment naissent les étoiles dans les nuages de gaz d'une galaxie spirale ? Des simulations numériques élucident le lien entre la dynamique de ces nuages et la formation des étoiles.

56 ÉPIDÉMIOLOGIE

Détecter les épidémies plus vite et plus tôt

David Ecker

Des appareils capables d'identifier rapidement presque tout pathogène sont en cours de développement. En les installant dans des hôpitaux répartis sur tout le territoire et en les interconnectant, on pourrait détecter et maîtriser les épidémies de façon plus précoce.

62 ÉCONOMIE

Des pyramides de Ponzi dans l'économie

Kaushik Basu

De nombreuses pratiques économiques ordinaires s'apparentent aux systèmes de Ponzi, montages financiers frauduleux où les premiers investisseurs sont rémunérés grâce aux fonds apportés par les suivants.

Rendez-vous

70 Histoire des sciences

Houtermans, physicien entre Hitler et Staline

Dieter Hoffmann

Ce pionnier de la physique nucléaire injustement oublié a réalisé ses remarquables travaux sous l'oppression nazie et stalinienne.

76 Logique & calcul

Cosmos : l'art de spéculer sérieusement

Jean-Paul Delahaye

Certains événements astrophysiques majeurs pourraient-ils être contrôlés par des intelligences supérieures ?

82 Science & fiction

Ces mondes glacés qui hébergeraient la vie

J. Sébastien Steyer et Roland Lehoucq

84 Art & science

Algorithmes psychédéliques

Loïc Mangin

86 Idées de physique

Des frites sous haute tension

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

89 Questions aux experts

Le vin blanc donne-t-il plus mal à la tête que les autres alcools ?

Henri-Jean Aubin

91 Science & gastronomie

Vers une cuisine plus qualitative

Hervé This

92 À lire

96 Bloc-notes

Les chroniques de Didier Nordon

Nouveautés numériques

POUR LA SCIENCE

Le site de référence de l'actualité scientifique internationale

L'application *Pour la Science*

Retrouvez dès leurs sorties *Pour la Science* + son hors-série *Dossier Pour la Science* en version numérique optimisée

Les Petits Thématiques

Des compilations numériques fiables et pratiques sur l'actualité scientifique

www.SciLogs.fr

La nouvelle plateforme [illegible] francophones

SCIENCE LES PETITS THÉMATIQUES SciLogs

Paléontologie humaine

La boucherie néandertalienne de Quincieux

Dans le département du Rhône, le chantier de construction de l'autoroute 466 a révélé un atelier de boucherie néandertalien d'il y a environ 40 000 ans.

Quelques-uns (*a* à *e*) des centaines de restes osseux mis au jour dans le site fouillé *(f)* à Quincieux, dans la région de Lyon.

Pourquoi toujours chasser de gros animaux, souvent dangereux ? Le site de Quincieux, qu'une équipe d'archéologues de l'Inrap dirigée par Jean-François Pasty vient de fouiller en urgence, illustre ce trait étrange des Néandertaliens.

Le site est contenu dans une couche de limon surmonté de sable, non loin de l'ancien lit de la Saône. Épaisse de plus de deux mètres, cette strate limoneuse date d'entre 55 000 et 35 000 ans, c'est-à-dire de la première moitié du stade isotopique marin 3 (59 000 à 24 000 ans). Dans l'histoire climatique de l'Europe, cette période interglaciaire se signale par de nombreux allers et retours entre des phases très froides de quelques milliers d'années et des périodes tempérées. Ce yo-yo climatique a dû être difficile à vivre pour des Néandertaliens peu nombreux, mais qui étaient bien adaptés, comme l'illustre Quincieux.

Le clan qui y a séjourné a en effet réussi à abattre (mais on ignore en combien de temps) une impressionnante macrofaune caractéristique d'un climat froid. Dans le limon, les archéologues ont exhumé plusieurs centaines de restes osseux de mammouths *(ci-dessus, b, une molaire)*, de rhinocéros laineux *(c, un morceau de corne, e, une mandibule)*, de chevaux *(d, une mandibule)*, de bisons ou encore de rennes. L'ours des cavernes est représenté par un crâne *(a)*, et les carnivores le sont par quelques ossements de loup.

Ces accumulations résultent de l'action de l'homme : les os sont isolés et rarement en connexion anatomique ; certains ont manifestement été brisés ; les os longs tendent à manquer, ce qui suggère que les gigots, cuisseaux et autres quartiers riches en viande et en graisse ont été emportés. En outre, quelques nucléus et des éclats débités par la technique Levallois, typiquement néandertalienne, gisent éparpillés parmi les os.

Ainsi, Quincieux semble être un atelier de boucherie néandertalien, comme on en a déjà trouvé de nombreux autres dans toute l'Europe, par exemple récemment en France à Hénin-sur-Cojeul (38 000 ans) et à Havrincourt (60 000 ans), dans la Somme.

Situés peut-être près des zones de chasse ou en un lieu favorable (bonne visibilité, sécurité, eau, gisement de matière première lithique, etc.), ces ateliers, distincts des sites d'abattage et des habitats, étaient les usines de l'industrie néandertalienne. L'implantation de celui de Quincieux s'inscrit bien dans cette typologie, puisqu'on y trouvait de l'eau et, dans le lit d'un ruisseau voisin, des galets de silex.

On peut imaginer qu'au cours des grandes chasses, le clan entier s'assemblait, d'abord pour aider à la chasse en rabattant et en signalant le gibier, tandis que les chasseurs, sans doute assistés par les adolescents, s'activaient à piéger et à tuer de gros animaux. Ensuite, après avoir éventuellement prélevé la peau, on découpait les carcasses en quartiers transportables à l'atelier. Là, une équipe débitait d'abord les quartiers de viande à emporter dans les cuisines de l'habitat pas forcément proche, ce qui, à Quincieux, expliquerait l'absence d'os longs. Une autre, peut-on penser, s'occupait de prélever les tendons (pour servir de liens), les vessies et les estomacs (sacs naturels), etc. Une autre encore se consacrait au travail des peaux, qui doit commencer d'emblée et requiert de l'eau.

Une interprétation tentante de la présence sur le site de Quincieux de restes d'ours des cavernes et de loups est d'ailleurs que les chasseurs traquaient aussi ces animaux pour leur fourrure. Dans le cas de l'ours des cavernes,

était facile, car il suffisait de surprendre ce grand plantigrade dans la grotte ou l'abri où il hibernait, et de le tuer pendant qu'il était en léthargie.

Ainsi, le site de Quincieux illustre une fois de plus le mode de vie néandertalien, dans lequel le clan entier s'assemblait pour aider à la chasse, puis pour exploiter les carcasses des grandes proies. Dans un climat où la survie de l'individu isolé était impensable, nul doute que l'implication simultanée de tous les membres du clan dans la production commune créait beaucoup de liens sociaux, se traduisant par une grande cohésion sans doute essentielle à la survie du groupe. La préférence des chasseurs néandertaliens pour les grosses proies s'explique peut-être ainsi : elle aurait été nécessaire pour faire tourner les usines néandertaliennes.

François Savatier

www.inrap.fr

Immunologie

Bisphénol A et intolérance alimentaire

Une équipe de l'unité de toxicologie alimentaire (ToxAlim) de l'Inra à Toulouse a montré chez le rat qu'une exposition à de faibles doses de bisphénol A avant et juste après la naissance augmente le risque d'intolérance alimentaire à l'âge adulte. Éric Houdeau, qui a dirigé le projet, nous explique ses travaux et leurs implications.

Le bisphénol A est connu en tant que perturbateur endocrinien – une substance qui altère les fonctions hormonales. Pourquoi avoir pensé qu'il pourrait aussi agir sur la tolérance alimentaire ?

Éric Houdeau : Le bisphénol A est un composant de nombreux plastiques et résines alimentaires. Bien qu'il soit interdit dans les biberons en France depuis 2010 et amené à y disparaître de tout conditionnement alimentaire d'ici 2015, nous y avons été exposés pendant plus de 30 ans. Or chez l'animal, cette substance, en perturbant le fonctionnement des hormones, touche aussi d'autres fonctions telles que le métabolisme des lipides ou le système immunitaire. Et la tolérance alimentaire est directement liée au système immunitaire : constamment confronté à de nouvelles protéines, celui-ci met en place une tolérance. Une intolérance alimentaire apparaît lorsqu'il se met à « classer » des protéines habituellement acceptées comme indésirables. Il déclenche alors une réaction inflammatoire dans l'intestin.

Les études chez l'homme ont-elles aussi montré un effet du bisphénol A sur le système immunitaire ?

É. H. : Il n'existait aucun indice en faveur d'un tel effet jusqu'à ce qu'en 2011, une étude épidémiologique américaine révèle, sur la base de données récoltées entre 2003 et 2006 par le programme de surveillance NHANES, un parallèle entre une contamination au bisphénol A et un système immunitaire devenant moins efficace avec le temps. Ces résultats suggéraient qu'une exposition chronique pouvait modifier durablement la programmation du système immunitaire.

Pourquoi s'intéresser à la période périnatale ?

É. H. : Durant la grossesse et l'allaitement, le système immunitaire est immature, car en développement, et les défenses de l'organisme se construisent au contact des aliments et de l'environnement. Il s'agit donc d'une période cruciale pour la mise en place de la tolérance alimentaire.

Eric Houdeau est directeur de recherche à l'Inra.

En quoi consistent vos expériences ?

É. H. : En 2010, nous avions observé que des rats exposés au bisphénol A durant la période périnatale présentaient une réaction inflammatoire exacerbée de l'intestin à l'âge adulte : quand on déclenchait une inflammation de l'intestin, leur réponse immunitaire était plus violente que chez des rats non exposés. Cela suggérait que les fonctions immunitaires étaient perturbées. Nous avons donc administré par voie orale à des rates gestantes diverses doses quotidiennes de bisphénol A, jusqu'au sevrage des petits. À l'âge adulte, la progéniture, nourrie à l'ovalbumine, une protéine du blanc d'œuf jamais consommée auparavant par ces animaux, développait plus souvent une réaction immunitaire contre elle que les rats nés de mères non exposées. Après plusieurs jours de nourriture à l'ovalbumine, les rats nés de mères exposées présentaient une inflammation du côlon : il y avait donc bien intolérance alimentaire.

De faibles doses de bisphénol A suffisaient à perturber les rats. Qu'en déduire pour nous ?

É. H. : Les perturbations les plus fortes ont en effet été obtenues avec une dose de bisphénol A considérée sans risque par l'Autorité européenne de sécurité des aliments, qui recommande qu'elle soit utilisée comme limite de consommation. Or seuls 4 % environ de la dose ingérée par la mère atteignent le fœtus. Notre étude montre que cette quantité est suffisante pour perturber la maturation du système immunitaire chez le rat. On voit ici toute la difficulté de fixer une dose journalière tolérable sûre de bisphénol A : ce n'est pas parce qu'on ne le détecte que très faiblement dans le sang qu'il ne perturbe pas le fonctionnement de l'organisme.

Marie-Neige Cordonnier

S. Menard et al., FASEB J., 2014

Les cris de la chauve-souris *Rhinolophus mehelyi* auraient évolué vers les hautes fréquences par sélection sexuelle.

Éthologie

Des sex-symbols aux cris aigus

Chez les chauves-souris *Rhinolophus mehelyi*, les femelles s'accouplent davantage avec les mâles aux cris plus aigus. C'est ce qu'ont montré Sébastien Puechmaille, de l'Institut Max Planck d'ornithologie, à Seewiesen, en Allemagne, et ses collègues.

La plupart des chauves-souris sont nocturnes et ont développé un système performant d'écholocalisation : elles émettent des cris et se fondent sur les échos renvoyés pour localiser leurs proies. Plus les cris sont aigus, plus ils sont atténués par l'air, et donc moins ils portent loin. Or ceux des chauves-souris *R. mehelyi* sont anormalement aigus pour des animaux de cette taille, ce qui les désavantage. Les résultats des chercheurs suggèrent que cette anomalie est due à un phénomène de sélection sexuelle : les préférences des femelles auraient conduit, au fil de l'évolution, à des cris de plus en plus aigus.

Guillaume Jacquemont

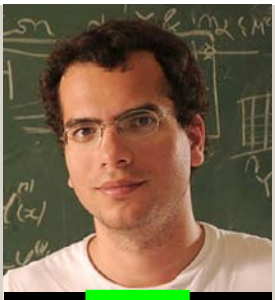
S. J. Puechmaille et al., PLoS One, en ligne le 30 juillet 2014

Mathématiques

Les médailles Fields 2014

Les noms des quatre lauréats de cette prestigieuse distinction ont été annoncés le 13 août dernier à Séoul, à l'ouverture du Congrès international des mathématiciens.

Maryam Mirzakhani



Artur Avila

Comme tous les quatre ans, le Congrès international des mathématiciens, tenu cette fois à Séoul, en Corée du Sud, a dévoilé les noms des récipiendaires de la médaille Fields, attribuée à des mathématiciens âgés de moins de 40 ans. Il s'agit du Franco-Brésilien Artur Avila, du Canado-Américain Manjul Bhargava, de l'Autrichien Martin Hairer et de l'Iranienne Maryam Mirzakhani, qui est la première femme lauréate de cette médaille.

Artur Avila est chercheur à l'Institut de mathématiques de Jussieu-Paris Rive Gauche et à l'IMPA (Institut de mathématiques pures et appliquées), à Rio de Janeiro. Il travaille principalement sur l'analyse et sur la théorie des systèmes dynamiques – l'étude mathématique des systèmes évoluant dans le temps selon des règles fixées. L'objectif est notamment de déterminer le comportement qualitatif, à long terme, du système sans avoir à calculer explicitement son évolution. Pour beaucoup de systèmes simples, l'évolution temporelle est soit régulière, soit chaotique, ce qui signifie qu'elle n'est pas prévisible à long terme, malgré le caractère déterministe des lois d'évolution (avec deux états initiaux même très similaires, la « trajectoire » suivie par le système finit par être très différente).

Entre autres, A. Avila a publié en 2003, avec deux autres mathématiciens, un résultat relatif à une vaste classe de systèmes dynamiques, les « applications unimodales » : si l'on choisit une telle application au hasard, elle sera soit régulière, soit « stochastique ». Le terme signifie ici que l'évolution temporelle a de bonnes propriétés probabilistes, qui permettent de la modéliser malgré son caractère chaotique.

Manjul Bhargava, professeur à l'Université de Princeton, a pour spécialité la théorie algébrique des nombres, où il a obtenu des résultats liés à ceux de Carl Friedrich Gauss au XIX^{e} siècle. Il a notamment trouvé, en associant un nombre à chaque sommet d'un cube et en coupant le cube en deux de façon à obtenir deux ensembles de quatre nombres, une façon simple et visuelle d'obtenir la loi qu'avait trouvée Gauss pour composer entre elles des formes quadratiques binaires (polynômes de la forme $ax^2 + bxy + cy^2$ où a, b et c sont des entiers). Il a étendu sa méthode à des polynômes de degré plus élevé et a découvert 13 nouvelles lois de composition. De telles lois fournissent des informations sur des structures nommées corps de nombres, qui jouent un rôle fondamental dans la théorie algébrique des nombres.

Martin Hairer, professeur à l'Université de Warwick, en Grande-Bretagne, étudie les équations aux dérivées partielles stochastiques. Une équation aux dérivées partielles est une équation différentielle (qui relie

Physique nucléaire

Le noyau atomique qui respire

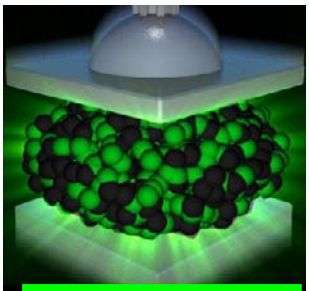
Lorsque les noyaux atomiques acquièrent une certaine énergie, ils sont excités : ils se déforment, vibrent, se mettent à tourner... Au GANIL (Grand accélérateur national d'ions lourds), à Caen, une équipe internationale autour de Marine Vandebrouck et Elias Khan, de l'Institut de physique nucléaire d'Orsay à l'Université Paris-Sud, a étudié des modes d'excitation particuliers, dits de respiration, dans un noyau instable riche en neutrons, le nickel 68.

Lorsque le noyau « respire », les protons et les neutrons se rapprochent et s'écartent régulièrement. La respiration du noyau est amorcée en le bombardant avec un projectile, tel un noyau de deutérium ou d'hélium. Pour étudier le nickel 68 instable, E. Khan et ses collègues ont adapté et amélioré la méthode d'excitation et de mesure déjà utilisée sur d'autres noyaux. La fréquence du mode de respiration a pu être mesurée avec une meilleure efficacité. Un second mode de respiration, plus faible et prévu par les théoriciens, a aussi été observé pour la première fois ; il correspondrait à une excitation spécifique des neutrons du noyau.

Cette technique pourrait être utilisée pour d'autres noyaux instables. De telles mesures seront utiles pour étudier la capacité de la matière nucléaire à se comprimer, phénomène qui pourrait concerner une étoile en fin de vie, lorsqu'elle s'effondre sur elle-même avant d'exploser en supernova.

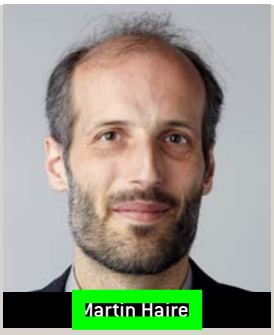
Sean Bailly

Phys. Rev. Lett., vol. 113, 032504, 201



La compressibilité des noyaux peut être étudiée à partir des modes d'excitation dits de respiration.

Manjul Bhargava



Martin Hairer

une fonction inconnue à une ou plusieurs de ses dérivées), mais où la fonction inconnue est une fonction de plusieurs variables et non d'une seule. L'équation est dite stochastique lorsqu'elle contient des termes à valeurs aléatoires, selon une certaine loi de probabilité.

M. Hairer a travaillé en particulier sur l'« équation KPZ », introduite en 1986 par des physiciens pour décrire l'évolution au cours du temps de la frontière entre deux substances, liquides par exemple. Il a conçu une méthode permettant de donner un sens mathématique précis à cette équation – voire à d'autres – et d'en trouver des solutions ayant également un sens.

Quant à Maryam Mirzakhani, professeur à l'Université Stanford, ses travaux ont notamment porté sur les géodésiques (chemins de longueur minimale) tracées sur des surfaces de géométrie hyperbolique (non euclidienne) et leurs « espaces de modules », des espaces abstraits et encore imparfaitement compris qui leur sont associés. Ses résultats portent en particulier sur les géodésiques fermées qui ne se recoupent pas. Plus généralement, ses recherches sont au carrefour de plusieurs domaines des mathématiques : géométrie hyperbolique, analyse complexe, topologie et théorie des systèmes dynamiques.

Maurice Mashaal

http://www.icm2014.org

Nevanlinna, Chern, Gauss...

Trois autres prix notables ont été décernés lors du Congrès de Séoul :

Le prix Rolf Nevanlinna pour les aspects informatiques des mathématiques) à Subhash Khot, de l'Institut Courant de sciences mathématiques de l'Université de New York. S. Khot a formulé en 2001 une conjecture dite UGC portant sur le coloriage de graphes. Lui et d'autres ont ensuite montré que si cette conjecture était vraie, on pourrait trouver des limites précises sur l'approximation qu'il est possible d'obtenir dans un grand nombre de questions de type combinatoire.

La médaille Chern à l'Américain Phillip Griffiths, de l'Institut d'études avancées de Princeton, dont les principales contributions portent sur la géométrie algébrique et la géométrie différentielle. Cette distinction récompense l'œuvre de toute une carrière de mathématicien.

Le prix Gauss à l'Américain Stanley Osher, de l'Université de Californie à Los Angeles ; ce prix est attribué pour des contributions ayant eu des applications significatives en dehors des mathématiques. S. Osher a en particulier développé, avec James Sethian, la méthode dite des surfaces de niveau, une méthode numérique de suivi de la déformation d'un objet considérant à considérer ce dernier comme une section d'un objet en dimension supérieure. Cette méthode a de nombreuses applications dans des domaines du traitement des images, des effets spéciaux, de la simulation numérique des écoulements fluides, etc.

Actualités

Moisson de poussières

En 2006, une capsule de la mission *Stardust* est revenue sur Terre. Elle abritait un réceptacle à aérogel qui a capté des poussières dans l'espace. Pour identifier celles-ci, 30 000 volontaires ont scruté les clichés de l'aérogel. Parmi les impacts, sept candidats ont été retenus comme pouvant être des poussières interstellaires. Mais Andrew Westphal, de l'Université de Berkeley, et ses collègues ont montré que les grains ont des compositions et des structures variées, qui s'accordent mal avec les modèles théoriques.

Une nuée de robots

De nombreux exemples de systèmes auto-assemblés existent dans la nature, mais la capacité de gérer simultanément les interactions d'une foule et le comportement des individus est un défi pour les systèmes artificiels. Michael Rubenstein et ses collègues, de l'Université Harvard, ont fabriqué une nuée de 1 000 petits robots autonomes. Chacun est équipé d'algorithmes qui définissent les règles qu'il doit appliquer en fonction de son voisinage, tout en suivant une instruction globale qui conduit la nuée à reproduire une forme simple, telles une étoile ou la lettre H.

Des coraux qui ont du nez

Les coraux déclinent : près de 50 % de ceux du Pacifique tropical ont déjà disparu. Or Danielle Dixson, de l'Institut *Georgia Tech*, à Atlanta, et ses collègues ont montré que leurs larves et celles des poissons coralliens se fient à leur odorat (sensibilité aux composés présents dans l'eau) pour se diriger préférentiellement vers les récifs sains, négligeant ceux qui sont détériorés et envahis par les algues. Les chercheurs suggèrent donc de diffuser les composés chimiques adéquats lors de la réhabilitation des récifs.

Science des matériaux

Comment protéger les canalisations en béton ?

Les réseaux de canalisation[s] sur lesquels les gouvernements du monde entier [ont] tant investi depuis plus [d'un] siècle, se dégradent et nécessitent d'onéreux travaux de maintenance. On sait que la dégradation des canalisations en béton est en grande partie due à la présence de sulfure d'hydrogène (H_2S) dans les eaux usées. Elje Pikaar et ses collègues de l'Université du Queensland, en Australie, ont analysé l'eau d'une banlieue urbaine de la région. Ils ont montré que 52 % du H_2S présent sont dus à l'utilisation de sulfate d'aluminium comme coagulant ou comme purifiant, lors du traitement de l'eau potable. En dehors du sulfate d'aluminium, le H_2S provient des déchets à 3[illegible] % et de l'eau de source à 10 %. Les ions sulfate (SO_4^{2-}) sont transformés en H_2S par certaines bactéries, puis en acide sulfurique (H_2SO_4) par d'autres. Il en résulte une dégradation du béton de plusieurs millimètres par an. I. Pikaar et ses collègues proposent de remplacer le sulfate d'aluminium par d'autres coagulants plus coûteux mais dépourvus de sulfate, tel le chlorure de fer. Différentes simulations sur ordinateur ont indiqué que dans de nombreux cas, cette solution permettrait de réduire notablement la dégradation des canalisations.

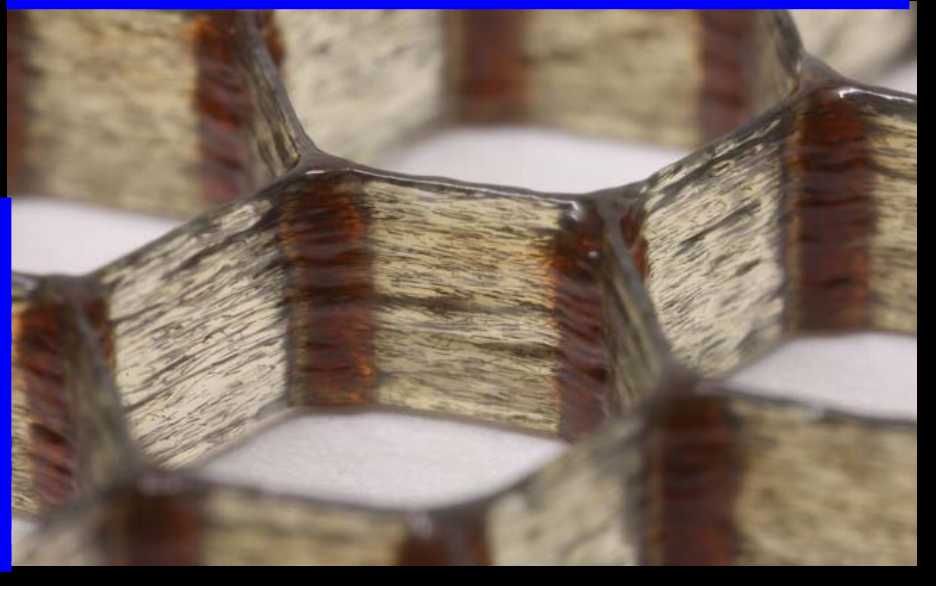
Benoît Mand[illegible]

Science, vol. 345, pp. 812-814, 201[illegible]

Insolite

Un matériau en nid d'abeille qui imite le bois

Brett Compton et Jennifer Lewis, de l'Université Harvard, se sont inspirés de la structure du bois pour fabriquer avec une imprimante 3D un matériau composite léger et rigide. Le bois est constitué de fibres de cellulose intégrées dans une matrice de lignine. Les chercheurs ont introduit des fibres de carbone dans la résine d'époxy de leur dispositif, l'ont façonné en nid d'abeille, et ont ainsi obtenu un matériau deux fois plus rigide que les composites plastiques imprimés.



Astrophysique

Un amas de galaxies cartographié avec une précision inégalée

En combinant les effets de lentille gravitationnelle et l'observation en rayons X d'un amas de galaxies, des astrophysiciens ont déterminé très précisément comment sa masse est répartie.

Dans le cadre du programme *Hubble Space Telescope Frontier Fields*, des effets de lentille gravitationnelle ont été répertoriés pour cartographier la distribution de la matière dans des amas de galaxies. Mathilde Jauzac, de l'Université de Durham, et ses collègues ont ainsi établi, pour l'amas MACSJ0416, la carte de la distribution de matière la plus précise jamais réalisée d'un amas galactique. Ils en ont aussi étudié la dynamique.

D'après la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein, une grande concentration de masse – telle une étoile, une galaxie ou un amas de galaxies – déforme l'espace-temps autour d'elle et dévie ainsi les rayons lumineux provenant d'une source plus éloignée et passant à proximité. Si l'objet massif est aligné avec la source d'arrière-plan, les rayons lumineux convergent vers l'observateur, de sorte que la luminosité de la source paraît amplifiée ; on parle alors de lentille gravitationnelle. L'effet de lentille est dit fort lorsque la lumière est amplifiée, que plusieurs images de la source sont visibles ou que l'image est tellement déformée que la source apparaît sous forme d'arcs lumineux. Lorsque la déviation est moins importante et l'image de la source légèrement déformée, on parle d'effet de lentille gravitationnelle faible.

Les effets de lentille gravitationnelle permettent d'estimer la masse de l'objet constituant la lentille. M. Jauzac et ses collègues ont ainsi utilisé les données du télescope *Hubble* pour mesurer les effets de lentille créés par l'amas MACSJ0416. L'élément remarquable est le nombre élevé d'images liées à l'effet de lentille gravitationnelle fort : les chercheurs en ont recensé 194 à partir de 68 objets situés en arrière-plan. En ajoutant les observations d'effets de lentille faible en périphérie de l'amas, et les données en rayons X du télescope spatial *Chandra*, ils ont estimé la masse de l'amas à environ $1{,}15 \times 10^{15}$ masses solaires, pour trois millions d'années-lumière d'extension. Le gaz et les étoiles représenteraient environ un dixième de la masse totale, le reste étant sous forme de matière noire, de nature encore inconnue.

Les astrophysiciens ont pu cartographier la répartition de la matière dans l'amas avec une précision inégalée. Ils y observent deux zones très denses, confirmant ce que l'on savait déjà en observant la répartition de ses galaxies : MACSJ0416 est formé de deux amas en cours de collision. Mais l'état actuel correspond-il à un état antérieur ou postérieur à la collision ?

Dans l'amas MACSJ0416, la situation n'est pas claire. M. Jauzac et ses collègues ont imaginé deux scénarios pour expliquer les observations. L'un correspond à une situation antérieure à la collision ; dans l'autre, les amas se sont déjà frôlés – échauffant une partie du gaz – puis se sont éloignés. Mais du fait de l'attraction gravitationnelle, l'amas le plus léger revient vers l'amas le plus lourd et une deuxième collision est en vue. De nouvelles données du télescope *Chandra* sont attendues ; elles permettront de trancher entre les deux scénarios.

S. B.

M. Jauzac et al., MNRAS, vol. 443(2), pp. 1549-1554, 2014

Cette image en fausses couleurs représente la distribution de matière dans l'amas de galaxies MACSJ041. On distingue les galaxies, le gaz chauffé *(en rouge autour des galaxies)*, qui émet des rayons X, et la matière noire *(en bleu)*, trahie par les effets de lentille gravitationnelle.

Mathématiques

La conjecture de Kepler formellement démontrée

Quelle est la meilleure façon d'empiler les oranges sur les étalages des primeurs pour perdre le moins d'espace possible ? Ou, en termes mathématiques, quel est l'arrangement compact de sphères identiques le plus dense ? En 1611, Johannes Kepler émet la conjecture que l'arrangement optimal est un empilement de plans où chaque sphère repose dans le creux formé par trois sphères adjacentes du plan inférieur. Cela correspond à deux configurations, l'empilement cubique à faces centrées et l'empilement hexagonal, la densité étant d'environ 74 pour cent. Thomas Hales, de l'Université de Pittsburgh, et son équipe ont enfin obtenu une démonstration formelle de cette conjecture.

En 1998, T. Hales avait soumis une première démonstration, longue de 300 pages. Une équipe de 12 mathématiciens avait été constituée pour vérifier la preuve, mais, après quatre années d'efforts, elle déclara que la démonstration est probablement juste à au moins 99 pour cent. Elle n'a pas pu s'assurer qu'aucune faille ne s'y était glissée.

En effet, dans une démonstration mathématique, il n'est pas rare que certaines étapes logiques soient omises, parce que considérées comme simples ou connues du lecteur. C'est aussi vrai lorsque des programmes informatiques sont utilisés, comme c'est le cas dans la démonstration de T. Hales. Par exemple, l'appel à certaines fonctions cache des algorithmes dont il n'est pas prouvé qu'ils n'introduisent pas des failles dans le raisonnement.

T. Hales a alors décidé de produire une preuve formelle de la conjecture et a créé, dès 2003, le projet *Flyspeck*. Dans une démonstration formelle, on s'assure que chaque étape de la preuve est logiquement valide. Cette approche est mise en œuvre grâce à des assistants de preuve sur ordinateur, qui utilisent une syntaxe logique pour construire la démonstration. Le 10 août 2014, l'équipe de T. Hales a annoncé la réussite du projet : la preuve formelle de la conjecture de Kepler a été obtenue, ce qui confirme que le résultat de 1998 était correct.

S. B.

https://code.google.com/p/flyspeck/

Astrophysique

Rosetta à portée de la comète

Après un voyage de 10 ans, la sonde spatiale *Rosetta* arrive au terme de son périple. Lancée le 2 mars 2004, cette mission de l'ESA (l'Agence spatiale européenne) devait étudier de près la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko. La rencontre a eu lieu le 6 août.

La sonde est maintenant en orbite à quelques dizaines de kilomètres de la surface de la comète, dont le noyau est constitué de deux blocs collés. Grâce aux photographies de la comète prises par les instruments de *Rosetta*, les chercheurs du CNES ont sélectionné cinq sites possibles pour larguer l'atterrisseur *Philaé* en novembre. Ce dernier s'amarrera à la surface, car la gravité de la comète est faible. Il effectuera une batterie de mesures pendant quelques mois si les conditions sont bonnes. En particulier, il percera la roche, prélèvera des carottes et en analysera la composition grâce à un petit laboratoire embarqué.

De prochaines photographies à plus basse altitude permettront d'évaluer plus précisément chacun des sites d'atterrissage.

Si tout se passe comme prévu, les données recueillies par *Rosetta* et *Philaé* permettront aux astrophysiciens de mieux comprendre comment le Système solaire s'est constitué. Les chercheurs en ont une vision globale, mais de nombreuses questions restent à éclaircir à l'aide des comètes, qui ont une composition proche de celle du Système solaire lors de sa formation.

S. B.

http://blogs.esa.int/rosetta

Pour poser l'atterrisseur *Philaé*, les chercheurs de l'ESA doivent trouver un site favorable. Ils en ont déjà sélectionné cinq *(notés A, B, C, I et J)*. Une analyse plus fine permettra d'estimer celui qui sera retenu.

Transformer un mauvais souvenir en un bon

L'émotion associée à un souvenir peut changer. Roger Redondo, du MIT, et ses collègues ont conditionné certaines souris à avoir peur d'un endroit (associé à un choc électrique) et d'autres à le trouver agréable. Ils ont ensuite inversé le conditionnement, tout en réactivant le souvenir par des techniques dites d'optogénétique. Ils ont alors constaté un changement des connexions entre les traces neuronales du souvenir situées dans l'amygdale, une aire cérébrale associée aux émotions, et celles localisées dans d'autres aires.

Les neutrinos, témoins de l'activité solaire

L'énergie du Soleil provient surtout de la fusion de protons, qui émet entre autres des neutrinos et des photons. Les neutrinos s'échappent en quelques secondes de l'astre, contre plus de 100 000 ans pour les photons. Le flux de ces neutrinos a été mesuré avec l'expérience *Borexino*, une détection difficile du fait de leur faible énergie. Les valeurs de la puissance du Soleil calculées à partir de ce flux et de celui des photons sont très proches. Cela montre que l'activité solaire a été stable durant les 100 000 dernières années.

Réparer les articulations avec le nez

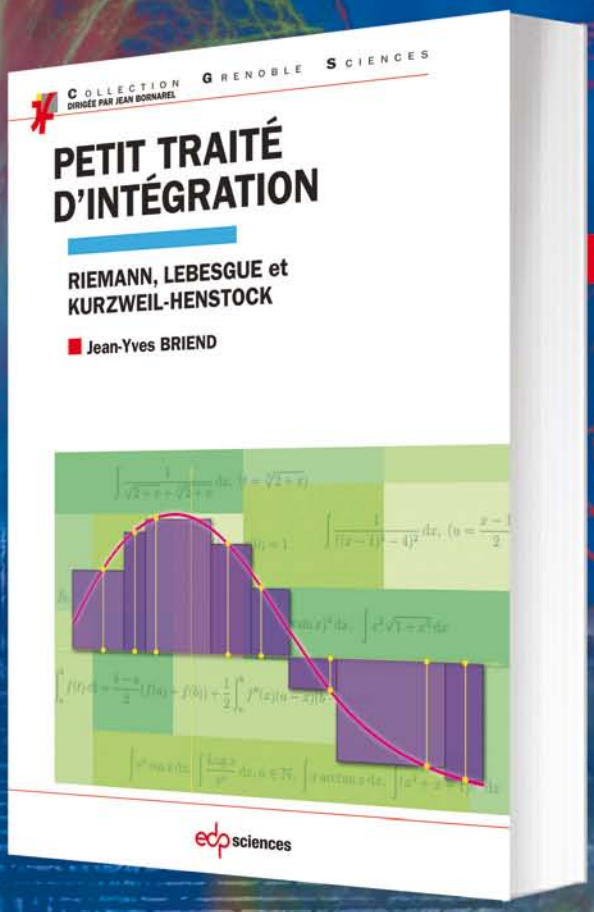
Pour traiter l'arthrose ou les blessures articulaires, les médecins cultivent des cellules du tissu lésé qu'ils réimplantent. Mais la méthode est peu efficace. L'équipe d'Ivan Martin, de l'Université de Bâle, a montré que le cartilage du nez se développe mieux que les autres. D'où l'idée d'utiliser ses cellules dans d'autres tissus lésés.

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

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

GRENOBLE SCIENCES

LES MATHÉMATIQUES



NOUVEAUTÉ

Le *Petit traité d'intégration* de Jean-Yves Briend : une approche originale et globale de l'intégrale

GRENOBLE SCIENCES est un centre de conseil et d'expertise. Le label *Grenoble Sciences* n'est attribué qu'aux ouvrages ayant atteint la qualité scientifique et pédagogique optimale.

D'AUTRES OUVRAGES LABELLISÉS EN MATHÉMATIQUES

■ GRENOBLE SCIENCES

POUR COMMANDER • **Les ouvrages sont en vente dans le rayon *Sciences* des librairies ou sur internet : *http://www.edition-sciences.com***

http://www.grenoble-sciences.com

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
Email : Grenoble.Sciences@ujf-grenoble.fr

Université Joseph Fourier GRENOBLE

Région RhôneAlpes

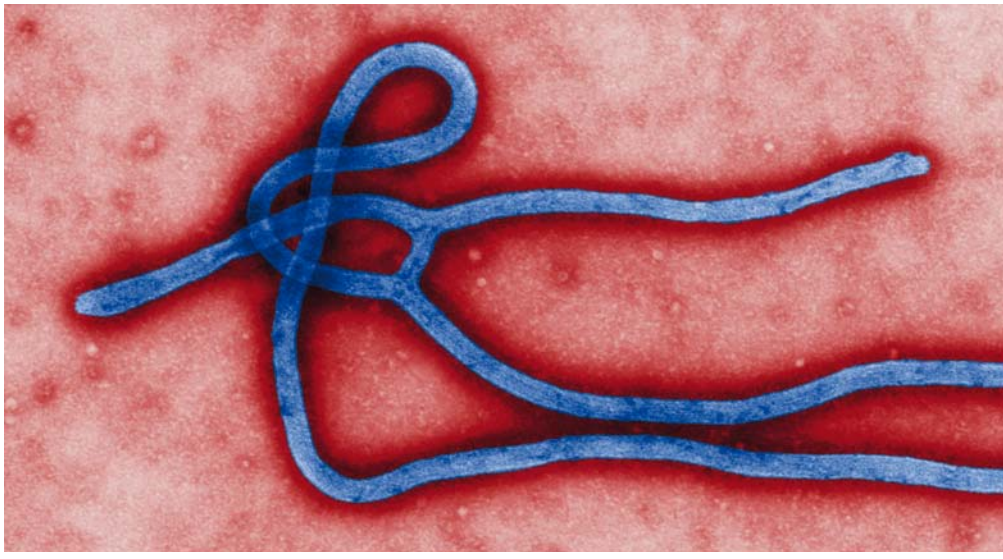
POINT DE VUE

Fièvre d'Ebola : une épidémie déroutante

Une inquiétante et inédite épidémie de fièvre hémorragique sévit en Afrique de l'Ouest. La contagion est en principe facile à enrayer… à condition d'en avoir les moyens !

Jean-Claude MANUGUERRA

Ebola est le nom d'une rivière proche de Yambuku, localité du Nord-Est de la République démocratique du Congo (RDC, l'ex-Zaïre). C'est dans cette ville d'Afrique centrale qu'a éclaté, en 1976, l'une des deux premières épidémies identifiées de cette fièvre hémorragique, qui ont touché 602 personnes au Zaïre et au Soudan, dont 431 sont décédées. Depuis février 2014, une nouvelle épidémie sévit en Afrique de l'Ouest ; elle est déroutante et sa gravité inquiète, avec plus de 1 400 décès dénombrés à la fin août. Qu'en connaît-on et quelles sont les principales craintes ?



Le virus Ebola, isolé en 1977 et dont des chauves-souris frugivores seraient le réservoir, est un virus à ARN du genre *Ebolavirus*. Parmi les cinq espèces de ce genre, l'espèce *Zaïre* est la plus pathogène pour l'homme, avec une létalité maximale de 90 %, suivie de l'espèce *Soudan* (létalité maximale de 65 %), puis de *Bundibugyo* (25 %) et enfin du virus *Forêt de Tai* (un seul cas non mortel). Quant au virus *Reston*, il n'est pas pathogène pour l'homme.

Le début de la maladie, en phase clinique, est non spécifique et ressemble à un syndrome grippal : brusque montée de la température avec une importante asthénie, des douleurs musculaires, des maux de tête et de gorge. Puis apparaissent très vite des douleurs abdominales avec vomissements, diarrhée et parfois éruption cutanée, accompagnés d'une importante altération de l'état général. Insuffisances hépatique et rénale complètent le tableau avec des signes hémorragiques fréquents (assez peu toutefois dans l'épidémie en cours) et variés.

Le virus Ebola peut infecter à tout âge tant les femmes que les hommes. Les personnes infectées encore en phase d'incubation (qui dure cinq à dix jours en général) ne transmettent pas le virus. Ainsi, seul un malade, c'est-à-dire une personne infectée présentant des signes cliniques, est contagieux.

La contamination exige un contact direct avec des organes et fluides corporels tels que le sang, les urines, les selles, les vomissures et la sueur d'un malade. L'infection résulte de la pénétration du virus par une plaie (même minime) sur la peau ou par les muqueuses buccales ou oculaires, ou par une piqûre avec une seringue par exemple.

Il n'existe aucun traitement spécifique de la fièvre d'Ebola. Des molécules actives et des vaccins sont en cours d'essais cliniques, mais restent non commercialisés. L'efficacité de l'immunothérapie passive (administration d'anticorps) fait débat et n'a pas été prouvée, le nombre de patients traités étant encore trop petit. Quant à des vaccins potentiels, ils ne sont sans doute pas compliqués à concevoir, mais prouver leur efficacité sur le terrain et les appliquer serait pratiquement impossible, compte tenu du petit nombre de flambées épidémiques et de leurs lieux imprévisibles.

L'épidémie en cours, pour laquelle l'Organisation mondiale de la santé (OMS) a reconnu que les conditions d'une urgence de santé publique de portée internationale étaient réunies, est inédite pour plusieurs raisons. À part la Côte d'Ivoire en 1994, le virus Ebola n'avait jamais frappé l'Afrique

de l'Ouest. Le berceau de la nouvelle épidémie se situe dans le Sud forestier de la Guinée-Conakry, sans doute dans le village de Meliandou où les premiers cas seraient apparus en décembre 2013. Des foyers sont ensuite apparus dans des villages alentour, puis se sont multipliés et ont gagné plusieurs régions du pays et, ce qui est inédit, une capitale de taille importante : Conakru.

Autre fait sans précédent, l'épidémie s'est propagée à deux pays limitrophes : le Libéria et la Sierra Leone, dont presque toutes les régions sont touchées, y compris les capi-

LE VIRUS EBOLA est de la famille des filovirus, des virus à ARN qui présentent un aspect filamenteux.

tales. C'est la plus grave épidémie d'Ebola avec, au 28 août 2014, un total de 3 069 cas recensés (plus que l'ensemble des 25 épidémies précédentes), dont 1 552 décès. Et la situation est rendue logistiquement très difficile par le nombre de foyers simultanés, lui aussi sans précédent.

Un quatrième pays non limitrophe a été touché par un voyageur ayant pris l'avion pour le Nigéria. C'est la première fois qu'un patient à symptômes prend un vol commercial (mais sans contaminer d'autres passagers ou des membres de l'équipage). Pour l'instant, la situation est contrôlée dans ce pays (17 cas dont six décès, tous des cas secondaires liés directement au voyageur).

L'épidémie devrait durer encore plusieurs mois, six à neuf selon l'OMS. L'urgence est d'arrêter la chaîne de contamination interhumaine. C'est possible par l'isolement précoce et systématique des malades et le suivi exhaustif de leurs contacts durant les 21 jours précédents. Mais cela nécessite d'importants moyens humains et financiers ainsi que l'adhésion des populations, alors que les pays concernés sont des régions pauvres, où la guerre civile a sévi dans un passé récent et où les autorités ont peu de crédit.

On peut être d'un relatif optimisme pour la région de Conakry en Guinée. En revanche, la situation en Sierra Leone et au Libéria est très préoccupante. Au Libéria, la situation est telle que l'état d'urgence a été instauré le 6 août, avec un couvre-feu sur l'ensemble du pays. Dans cet État comme en Sierra Leone, le système de santé, déjà défaillant, est soumis à une forte pression. Et des compagnies aériennes ont suspendu leurs vols avec ces deux pays, vers lesquels il sera de plus en plus difficile d'apporter l'aide internationale…

La grande crainte est que l'épidémie atteigne les pays limitrophes tels le Sénégal, la Côte d'Ivoire, voire le Mali, malgré les précautions de ces pays et de leurs partenaires. Quant à l'Europe, elle peut redouter un petit nombre de cas importés, mais ses ressources et ses systèmes de santé sont aptes à casser tout début de chaîne épidémique. Les épidémies, comme les autres fléaux, s'attaquent surtout aux pauvres. L'épidémie actuelle devrait donc rester limitée aux pays aux plus bas revenus et dont les populations partagent des traits culturels communs, notamment ceux consistant à toucher le mort lors des funérailles.

Certes, les partenaires du réseau mondial d'alerte et d'action en cas d'épidémie piloté par l'OMS – *Médecins sans frontières*, la *Fédération internationale des Sociétés de la Croix-Rouge et du Croissant-Rouge*, les *Centers for Disease Control and Prevention* américains, l'Institut Pasteur et son réseau international, etc. – sont pleinement mobilisés. Mais ils peinent à maintenir l'effort compte tenu de l'ampleur et de la durée de cette épidémie. ■

Jean-Claude MANUGUERRA dirige la Cellule d'intervention biologique d'urgence (CIBU) de l'Institut Pasteur, à Paris.

La 26e épidémie depuis 1976

- L'épidémie actuelle de fièvre d'Ebola a été précédée de 25 autres.
- Les plus petits épisodes épidémiques ont touché une seule personne ; le plus important, en Ouganda en 2000, a fait 425 victimes dont 224 sont mortes.
- Le nombre total de cas et de décès était, avant 2014, de 2 299 et de 1 540 respectivement.
- Pour les épisodes épidémiques de plus d'un cas, la létalité a varié de 25 % (Ouganda, 2007) à 90 % (RDC, 2003).
- Pour l'épidémie de 2014, le taux de létalité est jusqu'ici d'environ 50 %

Réagissez au Point de vue sur www.pourlascience.fr

ENTRETIEN

Gaz de schiste : pourra-t-on les exploiter proprement ?

Entretien avec Gilles PIJAUDIER-CABOT

Les hydrocarbures de schiste, un nouvel eldorado énergétique ou un désastre environnemental ? Le débat, vif, est exacerbé par des vidéos circulant sur Internet et montrant par exemple de l'eau contaminée par du gaz qui s'enflamme quand on approche un briquet à la sortie du robinet, dans des zones situées à proximité des forages. La technique de la fracturation hydraulique, pourtant utilisée pour extraire des hydrocarbures conventionnels depuis le milieu du XXe siècle, est au centre de toutes les critiques. Les partisans des hydrocarbures de schiste vantent l'ampleur des réserves. Mais les estimations sont-elles fiables ? Aux États-Unis, la production de gaz de schiste a en tout cas explosé au milieu des années 2000. Cet essor massif s'est déroulé dans un contexte peu réglementé, où la quête de la rentabilité a conduit à des accidents écologiques, telle la contamination des nappes phréatiques. Quelle est la part des limitations techniques et celle des mauvaises pratiques dans ces accidents ? Peut-on améliorer les techniques d'extraction pour exploiter sans risque les réserves ? Le point avec Gilles Pijaudier-Cabot, qui dirige le Laboratoire des fluides complexes et leurs réservoirs (UMR 5150, Total-CNRS-Université de Pau et des pays de l'Adour), et l'Institut Carnot ISIEoR.

POUR LA SCIENCE
Qu'est-ce qu'un pétrole, une huile ou un gaz de schiste ?

GILLES PIJAUDIER-CABOT : Il s'agit d'hydrocarbures piégés dans des argiles très peu perméables nommées schistes. Dans le cas d'hydrocarbures conventionnels, le pétrole ou le gaz se forme dans une roche qualifiée de roche-mère, puis migre vers le haut dans une « roche-réservoir » poreuse, surmontée par une « roche d'étanchéité », qui empêche leur fuite. Pour les schistes, les hydrocarbures restent piégés dans la roche-mère.

Par conséquent, les gisements sont plus difficiles à exploiter : il faut fracturer la roche pour que les hydrocarbures s'en échappent. Pour cela faire, on injecte de l'eau sous pression, mélangée à du sable (pour éviter que les fissures ne se referment trop vite) et à divers additifs (tels des lubrifiants favorisant la pénétration du sable dans les fissures).

Le terme d'huile désigne de façon générique tous les hydrocarbures liquides. Ceux-ci vont des pétroles « légers » (peu visqueux et comportant peu d'impuretés) aux plus lourds (les bitumes).

PLS
Quelle est l'ampleur de leur exploitation et des réserves ?

G. P.-C. : Aujourd'hui, on exploite surtout du gaz. Dans la plupart des cas, les huiles sortent beaucoup moins facilement de la roche. Elles sont tout de même exploitées dans quelques champs de puits aux États-Unis, et des recherches sont en cours pour développer des techniques d'extraction. En effet, la demande des pétroliers se redirige vers ce produit, en raison d'une certaine saturation des marchés du gaz due à l'afflux des gaz de schiste.

L'exploitation des schistes a surtout lieu aux États-Unis. Plusieurs pays commencent à explorer leur sous-sol en détail, voire, pour certains, à extraire du gaz. Ainsi, début 2014, une centaine de puits avaient déjà été creusés en Chine (contre 40 000 au total aux États-Unis).

Les réserves mondiales s'élèveraient à 345 milliards de barils de pétrole (55 milliards de mètres cubes) et 207 000 milliards de mètres cubes de gaz de schiste techniquement extractibles, selon une estimation de l'Agence américaine d'information sur l'énergie (EIA) datée de 2013. Cela représenterait 10 % du pétrole et 32 % du gaz techniquement exploitables dans le monde. Plusieurs pays seraient particulièrement bien dotés : États-Unis, Argentine, Russie, Algérie, Canada et le Mexique. En Europe, la France serait, avec 3 900 milliards de mètres cubes de gaz, en deuxième position, derrière la Pologne.

PLS
Ces estimations sont-elles fiables ?

G. P.-C. : Pas toujours. Dans le cas de la France, l'estimation est fondée sur des reconnaissances effectuées par le BRGM (Bureau de recherches

géologiques et minières), l'IFPEN (Institut français du pétrole et des énergies nouvelles) et quelques entreprises qui produisent du pétrole dans le pays (notamment en Seine-et-Marne). Cependant, cette estimation est soumise à de grandes incertitudes : les réserves réelles pourraient être dix fois supérieures ou dix fois inférieures. En outre, on est loin de toujours savoir si les gisements seraient faciles à exploiter et rentables. Le cas de la Pologne, où l'Institut national de géologie a divisé par dix les premières estimations américaines après avoir réalisé quelques dizaines de forages exploratoires, est emblématique.

Le forage d'une cinquantaine de puits à travers la France suffirait sans doute à préciser les estimations, mais des blocages institutionnels l'empêchent. Dans l'Hexagone, l'État est propriétaire du sous-sol. Il doit donc soit délivrer des permis de forage, soit l'organiser lui-même. Or tous les permis ont été annulés et l'État ne souhaite pas investir dans un tel programme de reconnaissance. L'argument pour annuler les permis est que si une entreprise prend le risque financier d'un tel programme, elle voudra nécessairement exploiter ce qu'elle trouve, et ce au moindre coût. Pour l'instant, c'est le *statu quo*. Aux États-Unis, le propriétaire d'un terrain est aussi propriétaire du sous-sol, de sorte que les compagnies privées n'ont qu'à le rémunérer pour explorer et exploiter son sous-sol.

UN FORAGE POUR L'EXTRACTION DE GAZ DE SCHISTE, dans la formation sédimentaire d'Eagle Ford, au Texas. Plus difficiles à récupérer que les hydrocarbures conventionnels, les gaz et huiles de schiste nécessitent un grand nombre d'infrastructures (forages, bassins pour stocker l'eau, routes, etc.). Cette « pollution de surface » est l'un des problèmes majeurs de leur exploitation.

PLS

Quelles sont les conséquences de l'exploitation des gaz de schiste, notamment sur le plan géostratégique ?

G. P.-C. : La première conséquence est une chute des prix du gaz, due à l'offre massive. Pour diminuer la saturation du marché, les États-Unis développent les débouchés autres que l'énergie. Ainsi, le pays connaît un renouveau de l'industrie pétrochimique, qui utilise le gaz comme matière première pour fabriquer divers composés, tels que des polymères. Par conséquent, certaines régions se réindustrialisent. Le phénomène concerne surtout les États-Unis, mais à terme toutes les régions productrices d'hydrocarbures (Arabie Saoudite, Algérie, etc.) pourraient en bénéficier.

Sur le plan géostratégique, les États-Unis sont devenus exportateurs de gaz et produisent désormais autant d'énergie qu'ils en consomment. Dès lors, ils sont moins dépendants des pays exportateurs tels que la Russie.

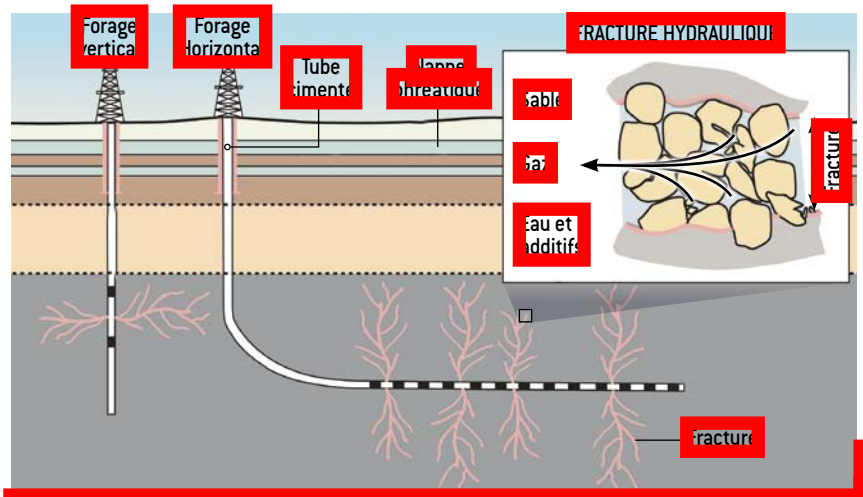
PLS

Quels sont les principaux risques environnementaux liés à cette exploitation ?

G. P.-C. : La pollution du sous-sol n'est pas un problème aux profondeurs d'injection (en général 2 000 à 4 000 mètres), où l'eau déjà présente est bien moins pure que celle qu'on injecte. On évoque parfois le danger que cette eau remonte jusqu'aux nappes phréatiques. Mais c'est peu probable, en dehors de configurations géologiques particulières : il faudrait que l'eau migre sur plusieurs centaines, voire milliers, de mètres (les nappes sont à une profondeur de l'ordre de 100 mètres). De multiples travaux sont en cours pour mieux comprendre l'impact de la fracturation hydraulique sur l'hydrologie du réservoir, et ainsi mieux cibler les zones à risque. En revanche, l'eau qui remonte par le puits contient des additifs et peut être contaminée par divers composés toxiques ou cancérigènes ; on doit donc la gérer avec soin pour ne pas menacer la santé des exploitants.

Le risque principal est qu'il y ait fuite d'eau par les puits et que cette eau traverse les nappes phréatiques. Techniquement, on sait gérer ce risque, qui existe d'ailleurs aussi dans les exploitations classiques (où la fracturation hydraulique est utilisée pour améliorer le taux de récupération). On assure par exemple l'étanchéité avec des tubes cimentés. Le problème est plutôt d'origine économique : les dispositifs de sécurité coûtent cher et les entreprises n'ont pas toujours fait les investissements nécessaires, d'où des cas de pollution aux États-Unis. Ce problème est plus aigu pour les hydrocarbures de schiste, car, en raison de la faible perméabilité de la roche, on doit forer bien plus de puits que dans les exploitations classiques. Et comme le prix du gaz chute, il faut creuser ces nombreux puits à moindre coût.

Selon moi, le seul problème qu'on ne sait pas résoudre techniquement est celui de la « pollution de surface » : les installations nécessaires occupent en effet beaucoup de place. Il faut construire des routes, des puits, des installations industrielles, ainsi que des bassins de décantation, car on remonte énormément d'eau des profondeurs ; on doit alors la stocker, puis la réinjecter ou la traiter avant de la rejeter dans l'environnement. De façon générale, la fourniture et la gestion de l'eau est l'une des problématiques à examiner attentivement dans une exploitation.



LA FRACTURATION HYDRAULIQUE consiste à injecter de l'eau sous pression dans le sol, afin de connecter les pores de la roche par des fissures et de récupérer le gaz qui y est piégé. Du sable mélangé à l'eau empêche les fissures de se refermer trop vite. L'eau sous pression, chargée de gaz, reflue ensuite naturellement dans le puits. Dans le cas des schistes, on utilise des forages horizontaux qui peuvent s'étendre sur plusieurs kilomètres.

PLS

On accuse aussi les forages d'entraîner des fuites de gaz à effet de serre…

G. P.-C. : Il y a en effet des fuites de méthane, un puissant gaz à effet de serre, dans l'atmosphère. Là encore, ce n'est pas inhérent aux schistes, mais commun à toutes les installations d'extraction de gaz, et là encore, le problème est économique plus que technique : comme il faut creuser de multiples puits à faible coût, les bonnes pratiques permettant la maîtrise des fuites ne sont pas toujours respectées. Dans le bilan des schistes en termes d'émissions de gaz à effet de serre, il faut aussi rappeler que la combustion du gaz naturel émet moins de dioxyde de carbone que celle du charbon à énergie égale. Le bilan global suscite donc la controverse.

PLS

On a aussi évoqué des risques de séisme et d'affaissement de terrain. Qu'en est-il ?

G. P.-C. : Pour les séismes, il existe bien sûr des zones instables, qu'il faut éviter. En dehors de ces zones, le risque est mineur : on constate de la microsismicité, mais trop faible pour affecter l'environnement ou l'habitat. D'autres activités humaines ont d'ailleurs plus d'impact. Ainsi, selon une étude américaine publiée en 2012, la géothermie avait provoqué des séismes plus nombreux et plus importants que l'exploitation des gaz de schiste.

Quant aux affaissements, on en a observé de légers dans les champs d'hydrocarbures conventionnels. Les réservoirs sont comme des éponges gorgées d'eau, qui se contractent en se vidant. En général, le terrain ne se tasse que d'un centimètre ou deux, ce qui ne pose pas de problème particulier. Pour les gaz de schiste, la situation est plus incertaine. Les roches sont sous-saturées en eau, c'est-à-dire qu'elles en absorbent beaucoup. On ne récupère que 30 ou 40 % de l'eau injectée. Le risque n'est donc pas tant de provoquer des affaissements que de modifier le comportement de la roche. Pour le comprendre, on peut se représenter une argile utilisée pour la poterie : quand on y ajoute de l'eau, on la transforme en une sorte de pâte à modeler. Dès lors, on pourrait provoquer des déformations et des mouvements de terrain, susceptibles de survenir plusieurs dizaines d'années après l'exploitation.

Le sentiment des ingénieurs est que le risque est faible, mais on manque de données scientifiques pour l'exclure totalement. Je ne connais que deux travaux publiés sur ce sujet. Dans mon laboratoire, nous avons lancé un projet pour l'étudier il y a un an, mais nos recherches, qui tentent d'éclaircir le phénomène au niveau moléculaire, sont encore très préliminaires.

PLS

L'Allemagne semble s'orienter vers une autorisation sous condition de l'exploitation. Des mesures réglementaires, telles des interdictions locales, vous semblent-elles suffisantes pour limiter les nuisances ?

G. P.-C. : Le problème en France est que l'on ne connaît pas assez bien le sous-sol. Pour décider d'interdire ou de restreindre l'exploitation dans une certaine zone, on doit disposer d'un certain nombre de paramètres : degré de fissuration, sismicité, stabilité et hydrologie du sous-sol, etc. Si l'on cherche à légiférer aujourd'hui sans bien cerner tous ces paramètres, on risque d'aboutir à l'application systématique du principe de précaution et à une interdiction généralisée.

Avant de fixer un cadre réglementaire, il faut donc d'abord lancer un grand programme d'exploration du sous-sol. Plusieurs projets existent. L'Alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie (ANCRE) a élaboré un programme de recherche sur les gaz de schiste qui coûterait environ 20 millions d'euros, et dont une partie importante serait consacrée à l'exploration. Pour l'instant, ces projets dorment sur les étagères…

Le seul cas sur lequel il serait intéressant de légiférer dès aujourd'hui est celui de la pollution de surface. Dans certaines zones, telles les réserves naturelles, les installations nécessaires à l'exploitation des schistes nuiraient trop au paysage et à la biodiversité.

PLS

Comment explore-t-on le sous-sol ?

G. P.-C. : L'exploration se déroule en trois phases. D'abord, on analyse la géologie de la surface et on en déduit certains paramètres du sous-sol. Ensuite, on utilise des explosifs pour envoyer des ondes sismiques dans le sous-sol, dont on reconstitue les propriétés grâce à l'analyse des ondes réfléchies. Sur la base de cette reconnaissance géophysique, on réalise quelques forages pour vérifier et affiner les résultats.

PLS

Quelles pistes envisage-t-on pour améliorer les techniques d'extraction ?

S. P.-C. : Le consensus parmi les ingénieurs et les chercheurs est que la priorité est d'améliorer la fracturation hydraulique, plutôt que de développer des alternatives. Cette technique est la plus mature techniquement et économiquement. L'objectif n'est pas forcément de fracturer davantage la roche, mais de mieux comprendre les phénomènes à l'œuvre afin d'améliorer la sécurité des exploitations (qui sont déjà rentables) et de mieux cibler les zones à risque.

De grands programmes ont été lancés. L'un, en Europe, se déroule principalement dans les universités du Pays-Bas et est financé par des groupes privés, tels BP, *Total* ou *Exxon*. Aux États-Unis, la *National Science Foundation* (NSF) soutient financièrement des projets associant entreprises et grandes universités. Au Canada, des recherches rassemblent aussi les principales universités. Chaque projet de ces programmes peut coûter plusieurs millions d'euros. D'autres projets, plus modestes, sont menés un peu partout.

PLS

Pourriez-vous préciser ce sur quoi portent tous ces projets ?

S. P.-C. : Il y a trois grands axes et un certain nombre de projets additionnels. Le premier grand axe vise à mieux comprendre la physique de la fracturation en milieu hétérogène. Que se passe-t-il quand la fracture rencontre un joint, c'est-à-dire une zone plus molle ou moins propice à la propagation ? S'y propage-t-elle tout de même ou s'y arrête-t-elle, laissant l'énergie se dissiper par l'ouverture d'autres fissures autour du joint ? C'est ce genre de questions, notamment, que nous étudions dans mon laboratoire.

Dans le deuxième grand axe, on cherche à modéliser numériquement le réservoir, afin de déterminer le trajet des fissures. Tandis que le premier axe concerne des analyses fines et locales, il s'agit ici de prévoir le comportement de tout le massif rocheux. Il est très difficile d'étudier la propagation des fissures à une échelle aussi vaste, car les calculs nécessaires deviennent très lourds.

Le troisième axe traite du contrôle *in situ* de la fracturation hydraulique. L'ouverture d'une fissure crée un bruit sismique, composé de petites ondes qui se propagent. On cherche alors à le détecter en surface et à déduire les endroits où la roche s'est fissurée. On pourrait alors surveiller cette dernière en temps réel. Des modèles ont été construits, et on en est au stade de la validation expérimentale.

Tous ces travaux permettront de mieux comprendre les phénomènes déclenchés dans le sous-sol par la fracturation hydraulique. C'est un point clef pour décider où elle risque d'être dangereuse, et ainsi autoriser ou non l'exploitation des gaz de schistes dans un endroit particulier.

PLS

Et sur quoi portent les autres projets ?

S. P.-C. : Certains visent à remplacer l'eau par un fluide différent, voire un gel. L'entreprise canadienne *GazFrac* commence à tester un gel de propane sur un site pilote et sa technique devrait être bientôt disponible. Ce gel pénètre mieux dans la roche, augmente le nombre de fissures et en ressort plus facilement. On peut le récupérer ensuite. La principale difficulté est que le propane est inflammable. Les installations doivent donc être sécurisées.

Enfin, quelques travaux visent à rendre les additifs plus propres, par exemple en les choisissant biodégradables. L'entreprise *Exxon* utilise ainsi de la gomme de guar (une sorte de haricot qui pousse surtout en Inde) pour augmenter la viscosité de l'eau.

PLS

Les pistes alternatives à la fracturation hydraulique sont-elles abandonnées ?

S. P.-C. : Non, pas complètement. La fracturation par explosifs est un peu étudiée aux États-Unis, mais elle en est encore au stade du laboratoire. De notre côté, nous travaillons sur une technique consistant à fracturer la roche grâce à des décharges électriques. Nous avons fait une pause dans les recherches, car nous en sommes à un stade où un prototype serait nécessaire, et c'est pour l'instant impossible à mettre en œuvre en France. L'avantage d'une telle technique, et d'autres qui sont à l'étude, est qu'elles permettraient un meilleur contrôle de la fissuration : celle-ci s'arrête vite quand on stoppe les impulsions électriques ou la mise à feu d'explosifs. Avec la fracturation hydraulique, le risque de propagation instable des fissures est plus élevé. ■

Propos recueillis par Guillaume JACQUEMONT

Quelques chiffres

- **Consommation mondiale de gaz (en 2013) : 3 347 milliards de m^3**
- **Réserves mondiales de gaz de schiste techniquement extractibles : 207 000 milliards de m^3 (soit 32 % des réserves totales de gaz), selon l'EIA.**
- **Production américaine de gaz (en 2011) : 651 milliards de m^3, dont 34 % de gaz de schiste.**
- **Consommation d'eau associée aux gaz de schistes : 10 000 à 15 000 m^3 par puits.**

BIBLIOGRAPHIE

P. Papon, **Le gaz de schiste : mythes et réalités**, *Futuribles*, n° 399, pp. 81-98, mars-avril 2014.

Energy outlook 2035, BP, 2014. bp.com/energyoutlook

D. Turcotte *et al.*, **Super fracking**, *Physics Today*, août 2014.

National Research Council, **Induced seismicity potential in energy technologies**, The National Academies Press, 2012 (en accès libre sur www.nap.edu).

J.-L. Fellous et C. Gautier, **Les gaz de schiste - Nouvel Eldorado ou impasse ?**, Odile Jacob, 2013.

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

Lu sur SciLogs
Les blogs scientifiques de Pour la Science

La gravité artificielle vue par le cinéma

par Richard Taillet, sur *Signal sur bruit*

Dans les films de science-fiction, les scènes d'apesanteur sont un casse-tête pour les réalisateurs : il faut user d'effets spéciaux et filmer dans des conditions inhabituelles. Rares sont les films où l'apesanteur n'est pas une simple parenthèse anecdotique. D'une façon ou d'une autre, une pesanteur artificielle est rapidement recréée et le scénario reprend son cours avec des personnages qui évoluent comme sur Terre. Comment est créée cette pesanteur artificielle ? Je me concentrerai ici sur une des explications plausibles : l'utilisation de centrifugeuses.

Si on place une roue de hamster en apesanteur, et qu'on fait tourner cette roue à vitesse angulaire constante, le hamster est soumis à une force centrifuge qui le plaque contre la roue. Il pourra alors marcher le long de celle-ci, comme s'il était soumis à une force de gravité dirigée vers l'extérieur. Remplaçons le hamster par un astronaute : c'est le principe des roues spatiales présentes par exemple dans les films *Conquest of space* (1955), *2001, l'Odyssée de l'espace* (1968) ou *Mission to Mars* (2000) *(voir les extraits à l'adresse http://bit.ly/pls444 scilogs)*.

En réalité, les personnages évoluant dans ces centrifugeuses sont aussi soumis à la force de Coriolis. Quand on saute vers le « haut » – vers le centre de la roue –, cette force nous entraîne sur le côté. Mais à ma connaissance, la force de Coriolis n'a jamais été exploitée dans un film.

Concentrons-nous donc sur la force centrifuge qui permet de simuler la gravité. La gravité g ressentie à la distance r de l'axe de rotation dépend de la vitesse de rotation N (en tours par seconde) selon la formule $g = r\,(2\pi N)^2$. On peut la calculer pour plusieurs films. Dans *2001, l'Odyssée de l'espace*, la station orbitale est une grande roue de 280 mètres de rayon, tournant à un tour par minute, et le vaisseau spatial envoyé vers Jupiter contient une centrifugeuse de six mètres de rayon tournant à trois tours par minute, ce qui donne respectivement $g = 3$ m/s^2 et $g = 0{,}6$ m/s^2, soit moins d'un tiers et moins d'un quinzième de la pesanteur terrestre (g = 9,8 m/s^2). Aucune de ces situations n'est donc réaliste : les personnages ne devraient pas pouvoir marcher de manière « naturelle ». La scène de *Conquest of space* est beaucoup plus réaliste, même si on a l'impression que la roue tourne trop vite.

La force centrifuge est d'autant plus faible que l'on se rapproche de l'axe de rotation et.

Dans le film *2001, l'Odyssée de l'espace*, la station spatiale comporte deux roues de 280 mètres de rayon en rotation.

dans les scènes où l'on voit les personnages se rapprocher *(Mission to Mars)* ou s'éloigner *(2001, l'Odyssée de l'espace)* de l'axe, ils devraient sentir que la gravité artificielle varie au cours de leur déplacement, ce qui n'est manifestement pas le cas. En revanche, le fait que la force centrifuge soit nulle au niveau de l'axe de rotation donne lieu à une belle scène de danse en apesanteur dans *Mission to Mars*.

L'utilisation de centrifugeuses présente cependant des limites physiologiques. D'une part, si les roues sont trop petites, la différence de pesanteur artificielle entre la tête et les pieds perturbe la circulation sanguine. D'autre part, le corps ne supporte pas une rotation trop rapide : l'oreille interne la détecte parfaitement. La scène d'*Armageddon* (1998) où un astronaute rétablit une pesanteur artificielle en faisant tourner sa capsule spatiale est ainsi totalement irréaliste : avec un rayon de un mètre, la vitesse de rotation nécessaire pour obtenir une pesanteur terrestre est d'environ un demi-tour par seconde, ce qui rendrait malade n'importe qui !

On rencontre des erreurs plus grossières encore. Dans *Ender's Game* (2013), on voit les personnages sortir d'une centrifugeuse et continuer à marcher au sol, pour finalement s'élancer en apesanteur. Dans *Moonraker* (1979), une station spatiale est mise en rotation pour établir une gravité artificielle, mais les objets sont collés sur la surface du disque, au lieu d'être poussés vers l'extérieur ! Dans *The Green Slime* (1968), la station spatiale en forme de roue a des fenêtres sur le bord extérieur, là où devraient marcher les passagers. Enfin, le film *Elysium* (2013) met en scène une centrifugeuse réaliste, sauf que l'air semble être retenu par la seule force centrifuge.

Pour terminer, l'idée de la centrifugeuse est très répandue dans le design des vaisseaux spatiaux, même si elle n'est pas explicitement exploitée : on voit souvent une grande structure en rotation, par exemple dans *2010* (1984), *Avatar* (2009) ou *Red Planet* (2000). Reste parfois seulement une grande structure circulaire fixe, comme dans la version originale de *Solaris* (1972) ou sa reprise (2002). ■

Richard TAILLET est professeur à l'Université de Savoie et chercheur au Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique théorique (LAPTh). Ce billet est une version résumée du troisième billet d'une série sur l'apesanteur au cinéma publiée sur son blog Signal sur bruit (http://www.scilogs.fr/signal-sur-bruit).

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

HOMO SAPIENS INFORMATICUS chronique de Gilles Dowek

Le vainqueur, un colosse aux pieds d'argile

Dans l'industrie informatique, les situations de monopole sont fréquentes… mais provisoires !

L'industrie des biens matériels nous a habitués à voir plusieurs entreprises se partager un marché. En revanche, l'industrie informatique nous montre plus souvent des situations de monopole : par exemple, il n'y a qu'un seul moteur de recherche réellement utilisé aujourd'hui.

Deux raisons, au moins, expliquent cette différence. La première est que le service proposé par certaines entreprises d'informatique, par exemple les réseaux sociaux, est la possibilité de communiquer avec ses autres clients. Si deux réseaux sociaux avaient, par exemple, l'un 60 % et l'autre 40 % du marché, les nouveaux clients se dirigeraient naturellement vers le premier, qui leur permet de communiquer avec davantage de personnes. La différence entre les deux croîtrait jusqu'à ce que le premier atteigne 100 % du marché et le second 0 %.

La seconde est que, en informatique plus qu'ailleurs, l'amélioration constante de la qualité des produits est essentielle pour garder les clients. Et comme la capacité à financer des projets de recherche et de développement, parfois la seule dépense des entreprises, croît avec le nombre de clients, si deux entreprises avaient, à nouveau, l'une 60 % et l'autre 40 % du marché, la première améliorerait la qualité de ses produits plus vite que la seconde, jusqu'à l'éliminer. C'est la loi du 0-1 : le vainqueur emporte toute la mise.

Cette tendance naturelle au monopole, cette disparition de la concurrence, cette concentration de pouvoirs, sera sans doute l'un des problèmes politiques majeurs du XXI[e] siècle, auquel le développement coopératif de logiciels libres est, parmi d'autres, un embryon de réponse. Car comment tolérer un monde où il n'y aurait qu'un seul hébergeur de sites Web, une seule librairie ou une seule université ?

Mais ce qui nous intéresse aujourd'hui est que notre explication de la loi du 0-1 semble avoir également comme conséquence qu'une fois en situation de monopole, une entreprise le reste pour l'éternité : car même si une autre entreprise était assez folle pour tenter de la concurrencer, elle serait vite, comme nous l'avons vu, laminée. Or c'est le contraire que nous observons : autant nous avons vu IBM, *Microsoft*, etc. remporter toute la mise, autant nous avons vu ces entreprises décliner aussi vite qu'elles étaient apparues.

Du fait de leur incapacité à anticiper les transformations, les géants de l'informatique sont rapidement remplacés par d'autres

Pour comprendre pourquoi, il faut remarquer que ce n'est pas en concurrençant IBM sur son terrain – la construction d'ordinateurs – que *Microsoft* a détrôné IBM, mais en se rendant compte que la construction d'ordinateurs était devenue une activité secondaire par rapport au développement de systèmes d'exploitation, développement qu'IBM a imprudemment sous-traité, en 1980, à *Microsoft*.

Pendant longtemps, les usagers cherchaient à avoir l'ordinateur le plus puissant et se souciaient peu du système d'exploitation. Puis une transition s'est produite et ils ont cessé de se préoccuper d'avoir un ordinateur ou un autre et ont cherché à avoir le système d'exploitation le plus performant : les ordinateurs ayant beaucoup progressé, le facteur limitant était devenu, non l'ordinateur, mais le système d'exploitation.

Il est rétrospectivement difficile d'imaginer qu'IBM n'ait pas vu cela, de même qu'il est difficile d'imaginer que *Microsoft* n'ait pas vu que les outils d'accès au Web devenaient plus importants que les systèmes d'exploitation et les logiciels de bureautique, ou que *Google* n'ait pas vu que la possibilité de publier sur le Web devenait plus importante que celle d'y accéder.

Du fait de cette incapacité à anticiper ces transformations, ces géants, même quand ils remportent toute la mise, sont des colosses aux pieds d'argile, rapidement remplacés par d'autres.

Au fait, comment se nommait cette plate-forme de publication sur le Web dans les années 2010 ? Mais si… souvenez-vous… avec son interface vieillotte et ses « amis » en nombre…

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

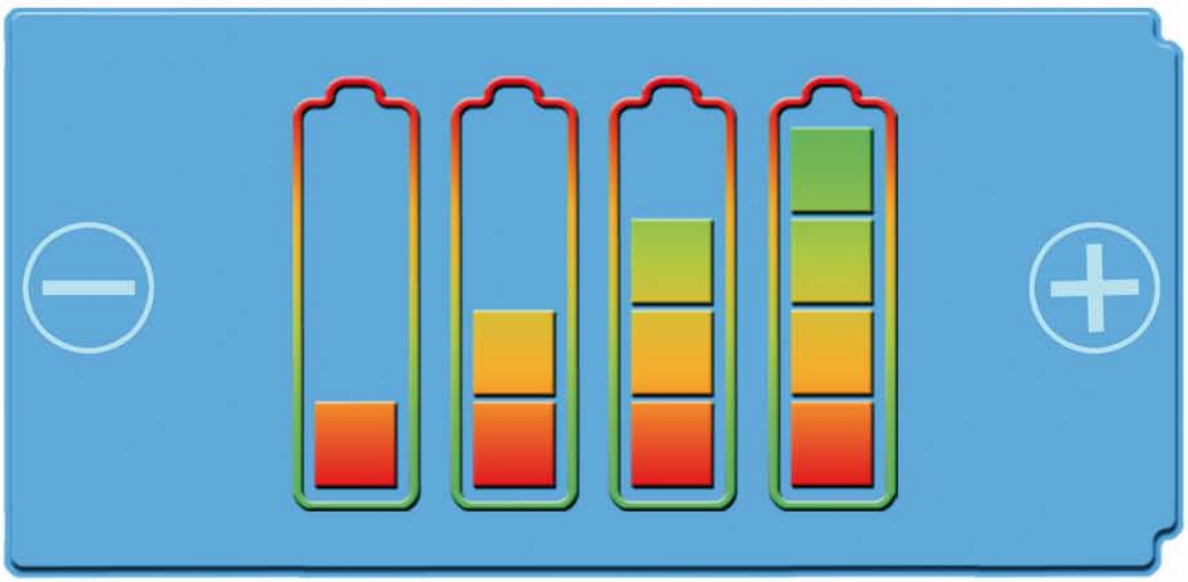
FONDATION ÉCOLOGIE D'AVENIR

INSTITUT DE FRANCE

COLLOQUE

CONVERSION ET STOCKAGE ÉLECTROCHIMIQUE DE L'ÉNERGIE : ENJEUX ET DÉFIS

Sous la direction de **JEAN-MARIE TARASCON** (Collège de France)



Avec la participation de :

Jean Claude Grenier (ICMCB Bordeaux), Dominique Larcher (UPJV-Amiens), Stéphane Lascaud (EDF Store and Forecast), Patrice Simon (CERIMAT-Toulouse) etc...

Jeudi 9 octobre 2014
15H-19H

LA MAISON DU BARREAU
4 RUE DE HARLAY - 75001 PARIS

WWW.FONDATIONECOLOGIEDAVENIR.ORG

Entrée gratuite - réservation obligatoire

CABINET DE CURIOSITES SOCIOLOGIQUES chronique de Gérald Bronne

Qui marche sur la Lune ?

La photographie d'un « homme » marchant sur la Lune a animé la communauté des internautes. Notre capacité à reconnaître des formes et des visages humains partout, héritée de nos ancêtres, en serait la cause.

L'homme a marché sur la Lune : pas de doute sur ce point, malgré quelques théories insensées prétendant le contraire. Cet homme s'appelait Neil Amstrong et il fit « un pas de géant pour l'humanité ». La question est ici différente : y a-t-il à l'heure où vous lisez ces lignes un homme se promenant tranquillement sur notre satellite naturel ? C'est une question que certains de nos concitoyens ont cru devoir poser à la vue d'une photo troublante obtenue grâce à *Google Moon* (un service qui permet de voir des images de la Lune fournies par satellite) : la silhouette d'un individu cheminant sur le sol lunaire.

Cette apparition mystérieuse a bien entendu fait le tour du Web, entraînant dans son sillage son lot désormais habituel d'élucubrations. Finalement, nous n'avons pas beaucoup changé depuis le XIX[e] siècle où le *New York Sun* publia un canular connu sous le terme de *Moon hoax* affirmant que des observations faites par télescope avaient permis d'apercevoir des formes de vie humanoïdes sur la Lune.

Une observation méthodique a montré que ce marcheur lunaire n'était rien d'autre que la projection d'une ombre de cratère. Cette confusion vient d'un phénomène connu sous le nom de paréidolie qui vient du grec *para* (faux), et *eidolon* (apparence), et qui qualifie notre capacité à voir des éléments formels dans ce qui n'est qu'informel, par exemple des animaux ou des visages dans des nuages ou des taches sur un support.

Ces phénomènes suscitent, un peu partout sur la planète, de curieuses processions. Ainsi, sous une autoroute de Chicago, des milliers de pèlerins se massent depuis que, selon eux, l'image de la Vierge Marie serait apparue sur un mur de béton. Cette forme n'est qu'une combinaison de taches diverses, mais elle n'en inspire pas moins la dévotion. Et que dire de l'engouement suscité, à Clearwater en Floride, en 1999, par l'apparition de la Vierge sur la vitre d'un building et qui attira un million de personnes ?

La capacité à percevoir des formes dans la production de phénomènes aléatoires est une disposition constante de l'esprit humain qui pourrait être un héritage biologique d'un temps où elle constituait un avantage sélectif face à un ennemi ou un prédateur. Elle permettait, par exemple, de distinguer un homme ou un animal à l'affût dissimulé dans un bosquet. Ainsi, dans un contexte hostile, mieux vaut avoir trop d'imagination que pas assez, et anticiper des dangers... qui n'existent pas. Ceux, parmi nos ancêtres, qui étaient dotés de cette imagination du pire avaient plus de chances de survivre que les autres.

Quand la technologie se met au service de nos réflexes les plus ancestraux, l'homme préhistorique refait son apparition..

Mais, aujourd'hui, ce réflexe dont nous avons hérité est devenu encombrant dans une société qui produit de plus en plus d'images. La probabilité que le hasard engendre des formes qui paraîtront signifiantes à l'esprit victime de paréidolie dépend du nombre d'images disponibles. Cet esprit considérera que ces formes (le visage d'un barbu qu'il prendra pour le Christ, par exemple) sont trop improbables pour avoir été produites par le hasard.

Ce raisonnement confond les catégories du particulier et du général. En d'autres termes, il est vrai qu'une tache de graisse ou d'humidité a une chance infinitésimale de former quelque chose qui ressemble au visage de la Vierge ou à la silhouette d'un homme marchant sur la Lune. Toutefois, il est faux de considérer que la chose est impossible. Elle devient même banale si l'on considère le nombre colossal de taches d'humidité qui se forment chaque jour dans le monde, et que l'on met à disposition de tous des outils susceptibles de les repérer. Ainsi, chaque année, le hasard produit des figures qui, en raison des dispositions naturelles de l'homme à percevoir du sens dans ce qui n'en a pas ou des formes dans l'informe, sont interprétées comme des signes. Ici, c'est le Christ, là le Bouddha ou Lénine, selon la sensibilité de chacun. Quand la technologie se met au service de nos réflexes les plus ancestraux, l'homme préhistorique refait son apparition dans notre contemporanéité. Et un mauvais réflexe fait alors une bonne histoire, ou une bonne photo que partagent des centaines de milliers d'internautes... ■

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

Voir : *http://www.mirror.co.uk/news/world-news/who-man-moon-strange-figure-4044903*

DÉCRYPTER LE CERVEAU : les outils du XXIe siècle

Rafael Yuste et George Church

Comment le cerveau produit-il nos pensées et nos émotions ? Pour le comprendre, les scientifiques devront disposer d'outils permettant de scruter l'activité des circuits cérébraux neurone par neurone.

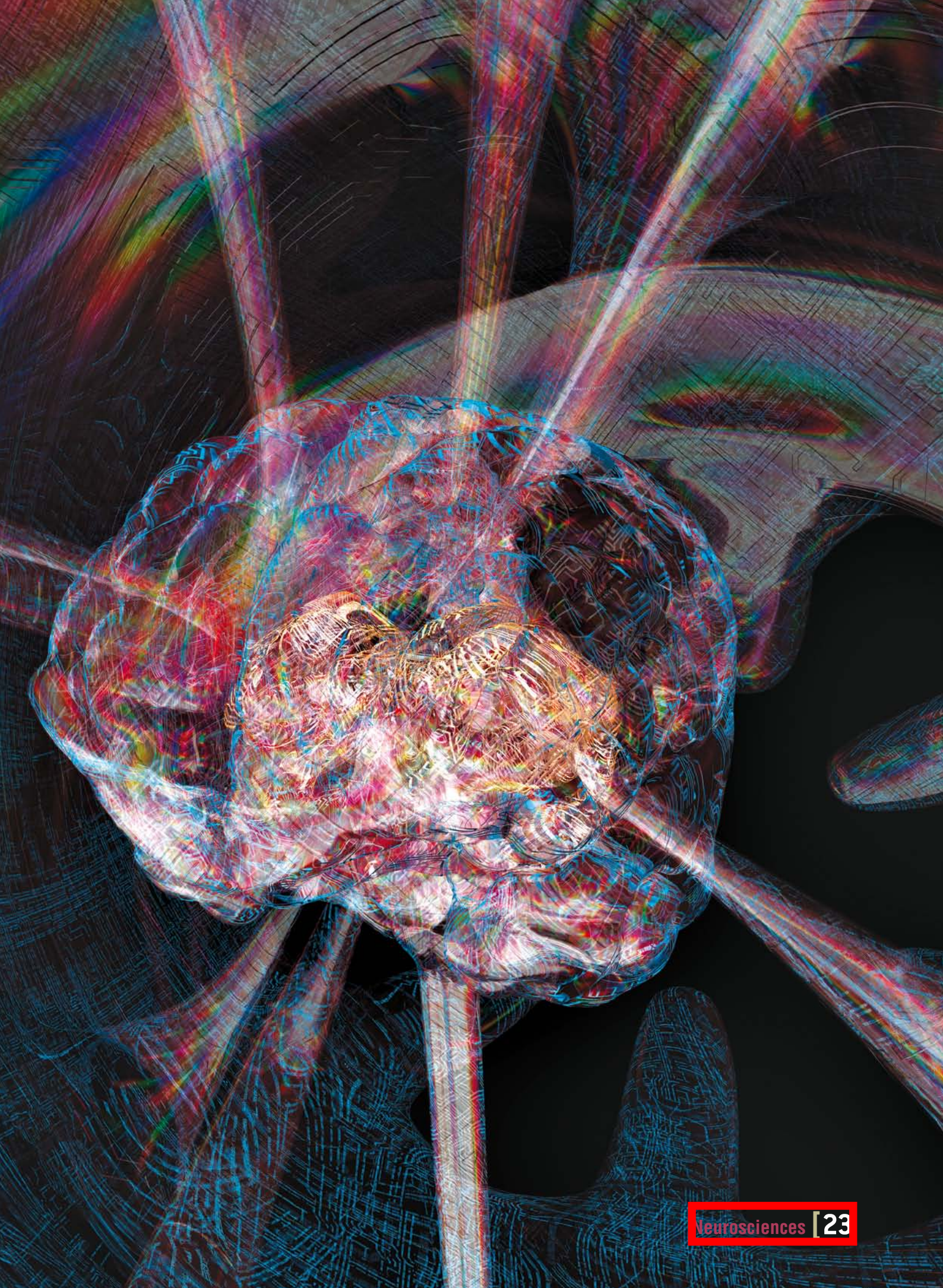
Malgré un siècle de recherches actives, les scientifiques ignorent toujours ce qui se passe dans l'organe de moins d'un kilogramme et demi qui est le siège de toute activité consciente humaine. Beaucoup ont essayé de s'attaquer à ces questions en examinant les systèmes nerveux d'organismes plus simples. En fait, 15 années se sont écoulées depuis que les chercheurs ont cartographié les connexions de chacune des 302 cellules nerveuses du nématode *Caenorhabditis elegans*. Pour autant, le schéma de câblage de ce minuscule ver n'a pas permis de comprendre comment ces connexions donnent naissance à des comportements même rudimentaires, tels que l'alimentation et la reproduction.

Chez l'homme, la difficulté rencontrée pour établir un lien entre anatomie et comportement est encore plus grande. Les médias font régulièrement état d'imageries cérébrales montrant que des zones particulières du cerveau s'activent lorsqu'on se sent rejeté, lorsqu'on parle une langue étrangère, etc. Ces annonces peuvent donner l'impression que les techniques actuelles fournissent de nouvelles connaissances fondamentales sur le fonctionnement du cerveau. C'est une fausse impression.

Un exemple notable de cette illusion est une étude récente largement médiatisée, où l'on a identifié une cellule cérébrale particulière qui a émis un signal électrique en réaction à la vue du visage de l'actrice américaine Jennifer Aniston. Bien qu'ayant fait sensation, la découverte du « neurone Jennifer Aniston » ne nous avance pas beaucoup. Nous sommes toujours dans la plus totale ignorance de la façon dont les impulsions

L'ESSENTIEL

- Le cerveau et son fonctionnement restent l'un des grands mystères de la science.
- De nouveaux outils, permettant d'analyser le fonctionnement de circuits formés d'une multitude de neurones, sont nécessaires pour progresser.
- Plusieurs techniques d'enregistrement ou de contrôle de l'activité de circuits cérébraux entiers commencent à voir le jour.
- Des projets de grande envergure sont dévolus à cet aspect, notamment l'initiative BRAIN aux États-Unis.



électriques de ce neurone influent sur la capacité de reconnaître le visage de Jennifer Aniston et d'établir un lien avec la série télévisée *Friends* où joue cette actrice. Pour que le cerveau reconnaisse l'actrice, un vaste ensemble de neurones doit probablement s'activer, neurones qui communiquent entre eux à l'aide d'un code non encore déchiffré.

Le neurone Jennifer Aniston est aussi un bon exemple de la croisée des chemins à laquelle se trouvent les neurosciences. Nous disposons de techniques permettant d'enregistrer l'activité de neurones isolés dans le cerveau humain. Mais pour progresser vraiment, les chercheurs ont besoin de nouvelles techniques qui leur permettront de sonder et de modifier l'activité électrique de milliers, voire de millions, de neurones – des techniques capables de déchiffrer ce que l'Espagnol Santiago Ramón y Cajal (1852-1934), pionnier de la neuroanatomie, appelait « les jungles impénétrables où de nombreux chercheurs se sont perdus ».

Un besoin criant de nouvelles techniques

Avec de telles percées méthodologiques, on pourrait, en principe, combler peu à peu les lacunes dans notre connaissance de la succession des événements qui se déroulent entre l'activation des neurones et la cognition (perception, émotion, prise de décision) et, en fin de compte, la conscience elle-même. Le déchiffrement des schémas précis de l'activité cérébrale sous-jacente à la pensée et aux divers comportements fournira également des informations essentielles sur le dysfonctionnement des circuits neuronaux dans des troubles psychiatriques et neurologiques tels que la schizophrénie, l'autisme, les maladies d'Alzheimer ou de Parkinson.

Des appels à des bonds en avant des techniques d'étude du cerveau ont commencé à être entendus en dehors des laboratoires. De fait, l'administration du président américain Barack Obama a annoncé l'année dernière le lancement d'une vaste initiative en faveur du développement de neurotechnologies innovantes, nommée BRAIN (*Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies*, ou Recherches sur le cerveau par le développement de neurotechnologies innovantes). Cette initiative constitue, dans ce second mandat du président, l'effort le plus visible consacré à la science lourde, la « Big Science ».

LES AUTEURS

Rafael YUSTE est professeur de sciences biologiques et de neurosciences à l'Université Columbia, aux États-Unis. Il codirige l'Institut de la fondation Kavli pour la science du cerveau.

George CHURCH est professeur de génétique à l'Université Harvard, aux États-Unis.

Le cerveau humain en chiffres

- Une masse d'environ 1,3 à 1,5 kilogramme, dont 80 % sont constitués par le cortex
- De l'ordre de 86 milliards de neurones, dont 16 milliards pour le cortex
- Un nombre similaire de cellules non neuronales
- Un cortex de quatre millimètres d'épaisseur et présentant une surface de 2,5 mètres carrés
- 10^{13} à 10^{15} connexions synaptiques
- 20 % de la consommation d'oxygène par l'organisme

Le projet BRAIN, initialement financé à hauteur de 100 millions de dollars (74 millions d'euros) en 2014, vise à développer des techniques permettant d'enregistrer les signaux électriques et chimiques émanant de cellules cérébrales beaucoup plus nombreuses, voire de régions entières du cerveau. BRAIN vient compléter d'autres grands projets de neurosciences menés en dehors des États-Unis. Le projet *Human Brain Project* (Projet du cerveau humain), financé par l'Union européenne, est un effort de recherche de 1,2 milliard d'euros sur dix ans, qui vise à élaborer une simulation informatique de l'ensemble du cerveau. D'ambitieux projets ont également été lancés en Chine, au Japon et en Israël. Le consensus mondial qui pousse actuellement à investir dans la recherche sur le cerveau rappelle d'autres initiatives d'après-guerre de recherches scientifiques et technologiques concentrées sur des priorités nationales urgentes : l'énergie et l'armement nucléaires, l'exploration spatiale, l'informatique, les énergies alternatives, le séquençage de génomes. Désormais, c'est le siècle du cerveau qui s'ouvre à nous.

Retracer comment les cellules cérébrales forgent le concept de Jennifer Aniston (ou une autre entité mentale) constitue pour le moment un obstacle insurmontable. Cela exige de passer d'une mesure effectuée sur un seul neurone à la compréhension de la façon dont une assemblée de neurones établit des interactions complexes pour créer une entité globale – ce que les scientifiques nomment une propriété émergente.

La résistance mécanique ou l'état magnétique d'un matériau, par exemple, émergent des interactions d'une multitude de molécules ou d'atomes. Considérons par exemple des atomes de carbone. Les mêmes atomes peuvent se lier pour former soit du diamant, le plus dur des matériaux, soit du graphite, si mou qu'il permet d'écrire avec sur du papier. Dureté ou mollesse, ces propriétés émergentes ne dépendent pas des atomes pris isolément, mais de l'ensemble de leurs interactions.

De la même façon, le cerveau présente probablement des propriétés émergentes qui restent totalement inintelligibles si l'on examine des neurones isolés ou même si l'on dispose d'une image grossière de l'activité de grands groupes de neurones. La perception d'une fleur ou le rappel d'un souvenir d'enfance mettent en jeu l'activité de circuits cérébraux qui véhiculent des

signaux électriques à travers des chaînes complexes de centaines ou de milliers de neurones.

Une tentative visant à franchir cet obstacle consiste à dresser une carte des connexions anatomiques (ou synapses) qui relient les neurones, une entreprise nommée connectomique *(voir la figure 1)*. Le Projet du connectome humain, récemment lancé aux États-Unis, fournira un schéma structurel du câblage du cerveau. Toutefois, comme pour le ver nématode, ce schéma n'est qu'un point de départ, puisqu'il n'indique pas les signaux électriques fluctuants associés aux processus cognitifs.

Comment enregistrer l'activité des neurones ?

Dans les méthodes classiques les plus fines pour mesurer l'activité neuronale, des électrodes en forme d'aiguilles enregistrent la décharge d'un seul neurone, événement qui correspond à l'émission d'un « potentiel d'action ». Cette impulsion électrique est déclenchée par la réception de signaux chimiques d'autres neurones. Quand un neurone reçoit une stimulation appropriée, le voltage dans la membrane externe de la cellule s'inverse. Ce changement provoque une ouverture des canaux de la membrane et une entrée d'ions positifs (de sodium, de calcium, etc.) dans la cellule. Cet afflux produit à son tour un potentiel d'action, qui parcourt la longue projection de la cellule, l'axone, et déclenche la libération d'un signal chimique vers d'autres neurones, lesquels continuent ainsi à propager le signal.

Enregistrer l'activité d'un seul neurone revient à essayer de suivre le déroulement d'un film en haute définition alors qu'on ne voit qu'un seul pixel. C'est aussi une technique invasive qui peut endommager les tissus cérébraux lorsque les électrodes y pénètrent.

À l'autre bout de l'échelle, les méthodes permettant de suivre l'activité des neurones à travers le cerveau entier sont aussi inadéquates. Dans l'électroencéphalographie (EEG), technique bien connue et inventée par Hans Berger dans les années 1920, des électrodes placées sur le crâne mesurent l'activité combinée de plus de 100 000 cellules nerveuses sous-jacentes. L'EEG enregistre les variations rapides, à l'échelle de la milliseconde, du signal électrique, mais elle ne peut distinguer les neurones qui sont actifs.

L'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), qui produit des images où les zones cérébrales actives sont représentées en couleurs, enregistre l'activité dans l'ensemble du cerveau de façon non invasive, mais les résolutions temporelle et spatiale sont faibles. Chaque élément de l'image ou voxel (pixel tridimensionnel) correspond à environ 80 000 neurones. De plus, l'IRMf ne suit pas directement l'activité neuronale, mais enregistre les variations correspondantes du flux sanguin dans les voxels.

1. LA CONNECTOMIQUE a pour objectif d'établir la carte de toutes les connexions neuronales du cerveau. L'image ci-dessus représente ainsi les voies suivies par les fibres de la substance blanche, composée essentiellement d'axones. Dans cette reconstruction obtenue par la technique d'IRM de diffusion, les couleurs codent l'orientation des fibres : rouge pour la direction gauche-droite, vert pour la direction avant-arrière et bleu pour la direction dessus-dessous.

Pour accéder aux schémas d'activation du cerveau dans l'espace et le temps, les chercheurs ont besoin de nouveaux détecteurs capables d'enregistrer les signaux de groupes de plusieurs milliers de neurones.

Les nanotechnologies peuvent aider à réaliser des enregistrements à grande échelle. Des prototypes incorporant plus de 100 000 électrodes sur une base de silicium ont été construits ; de tels dispositifs permettraient d'enregistrer l'activité électrique de dizaines de milliers de neurones de la rétine. Poussée plus avant, cette technologie permettrait d'empiler ces ensembles d'électrodes en structures tridimensionnelles, de miniaturiser les électrodes pour éviter de léser les tissus et d'allonger le dispositif pour pénétrer profondément dans le cortex cérébral, la couche externe du cerveau. On enregistrerait ainsi l'activité électrique de milliers de neurones chez un patient humain, cellule par cellule.

Les électrodes ne sont que l'un des moyens de suivre l'activité neuronale. Des méthodes allant au-delà de l'utilisation de détecteurs électriques font leur apparition dans les laboratoires. Les biologistes commencent à se servir de techniques conçues par des physiciens, des chimistes et des généticiens pour visualiser des neurones vivants chez des animaux vaquant à leurs occupations quotidiennes.

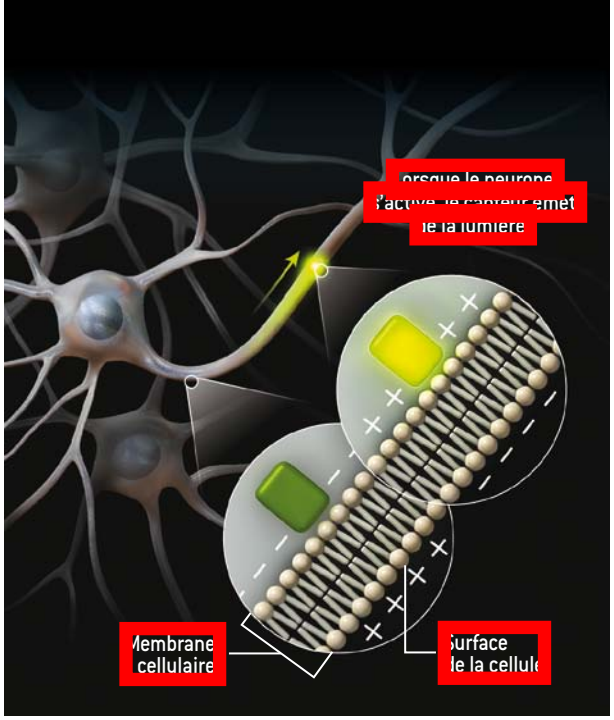
Les travaux de Misha Ahrens et ses collègues, à l'Institut médical Howard Hugues, aux États-Unis, laissent entrevoir ce que l'avenir pourrait nous réserver. L'année dernière, ces chercheurs ont obtenu des images de l'activité des neurones de l'ensemble du cerveau de la larve de poisson zèbre. Ce poisson est l'un des organismes préférés des neurobiologistes, parce que l'espèce est transparente au stade larvaire, ce qui permet d'observer facilement l'intérieur de son corps, et notamment son cerveau. Les chercheurs ont modifié génétiquement les neurones du poisson zèbre pour qu'ils deviennent fluorescents lorsque des ions calcium pénètrent dans la

À L'ÉCOUTE DE MILLIONS DE NEURONES

Les neurobiologistes ont besoin de moyens plus efficaces et moins invasifs pour observer les circuits cérébraux, où des signaux électriques passent d'un neurone à l'autre. Toute un éventail de techniques, certaines déjà utilisées et d'autres n'existant encore que dans l'imagination des chercheurs, pourraient aider les scientifiques à enregistrer les signaux de milliers, voire de millions, de neurones. Elles remplaceront les anciennes méthodes peu précises, qui nécessitent souvent l'utilisation de sondes électriques invasives.

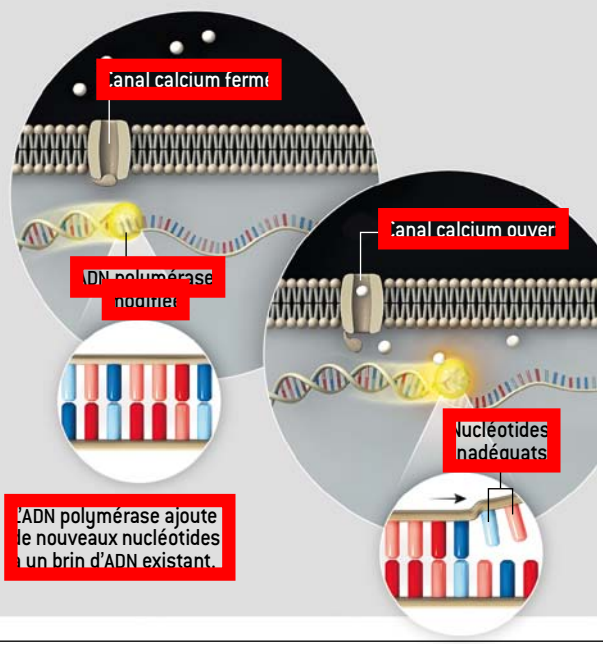
Imagerie de voltage

Dans cette technique, on implante un colorant au sein du neurone afin de déterminer si la cellule est active. Il constitue un capteur, qui émet une fluorescence lorsque le champ électrique à travers la membrane cellulaire change de polarité ; cela se produit quand un signal électrique passe. Un détecteur *(non représenté)* enregistre l'événement et peut aussi suivre l'activité de nombreux autres neurones, marqués à l'aide du même colorant.



Une bande d'enregistrement constituée d'ADN

Une approche radicalement nouvelle, celle de la bande d'enregistrement moléculaire, consisterait selon l'un des scénarios à placer à l'intérieur d'une cellule, mais près de sa surface, un brin d'ADN de séquence de nucléotides connue. Une enzyme, de l'ADN polymérase modifiée, ajouterait ensuite de nouveaux nucléotides qui se lieraient aux premiers pour former un double brin d'ADN *(à gauche)*. Lorsqu'un neurone s'active, des ions calcium pénètrent par un canal venant de s'ouvrir dans la membrane. Cet afflux entraîne l'ajout par l'enzyme d'un nucléotide erroné, erreur qui pourrait être détectée lors du séquençage ultérieur du brin d'ADN.



cellule après son activation. Un nouveau type de microscope éclairait le cerveau du poisson zèbre en projetant un feuillet de lumière sur l'organe, pendant qu'un appareil photo effectuait des prises de vue toutes les secondes.

Suivre l'activité d'un cerveau entier

La technique utilisée, l'« imagerie calcique », qui avait été inaugurée par l'un de nous (R. Yuste) pour enregistrer l'activité électrique de circuits neuronaux, a permis de suivre l'activité de 80 pour cent des 100 000 neurones du poisson zèbre *(voir la figure 2)*. L'expérience a montré que lorsque la larve du poisson zèbre est au repos, de nombreuses zones de son système nerveux s'activent et s'éteignent suivant des schémas mystérieux. Depuis que l'électroencéphalographie existe, les chercheurs savent que le système nerveux est, pour l'essentiel, toujours actif. L'expérience réalisée sur le poisson zèbre laisse espérer que grâce à des techniques plus poussées, on pourra relever un défi majeur en neurosciences : comprendre l'activation spontanée et incessante de grands groupes de neurones.

L'expérience du poisson zèbre n'est qu'un début, car les neurosciences ont besoin de techniques encore plus performantes pour que l'on comprenne comment l'activité cérébrale engendre des comportements. De nouveaux microscopes doivent être conçus pour visualiser en trois dimensions l'activité cérébrale. De plus, l'imagerie calcique est trop lente pour suivre l'activation rapide des neurones et elle est également incapable de mesurer les signaux inhibiteurs qui ralentissent l'activité électrique de la cellule.

Des neurophysiologistes, en collaboration avec des généticiens, des physiciens et des chimistes, essayent d'améliorer des techniques optiques qui enregistrent directement l'activité des neurones en détectant les variations de potentiel électrique dans leur membrane. Des colorants dont les propriétés optiques varient avec le voltage, et qui seraient soit fixés à la surface du neurone, soit intégrés à la membrane elle-même par génie génétique, pourraient faire mieux que l'imagerie calcique. Cette technique alternative, l'« imagerie de voltage », permettrait à terme d'enregistrer l'activité électrique de chacun des neurones d'un circuit entier.

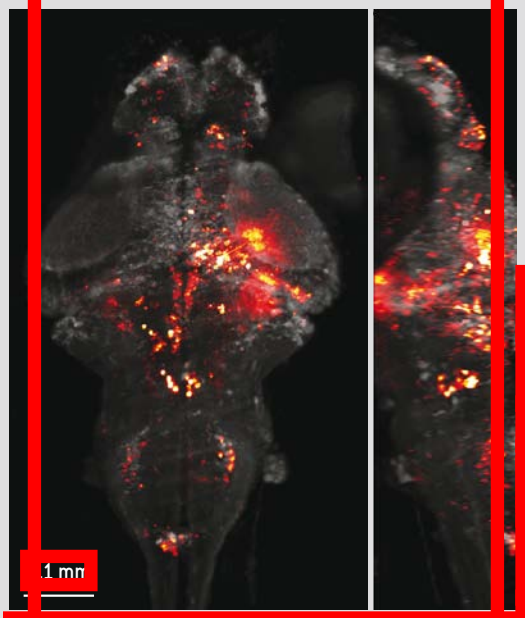
Cependant, l'imagerie de voltage n'en est qu'à ses débuts. Les chimistes doivent augmenter la capacité des colorants à changer de couleur lorsqu'un neurone s'active. Il faut également concevoir les colorants de façon à ce qu'ils n'endommagent pas le neurone lui-même. Déjà, cependant, des biologistes moléculaires élaborent des sondes de voltage codées génétiquement ; il s'agit de cellules qui synthétisent une protéine fluorescente pouvant s'intégrer à la membrane externe des cellules. Une fois en place, ces protéines réagissent aux modifications du voltage du neurone par un changement d'intensité de leur fluorescence.

Comme pour les électrodes, des systèmes nanotechnologiques peuvent être utiles. À la place de colorants organiques ou d'indicateurs génétiques, il est possible de réaliser un nouveau type de détecteur de voltage constitué de « boîtes quantiques », de petites particules semi-conductrices présentant des effets quantiques et dont on peut ajuster avec précision les propriétés optiques telles que la couleur ou l'intensité de la lumière émise. Les nanodiamants, autre nouveau matériau issu de l'optique quantique, sont très sensibles aux variations des champs électriques liés à l'activité neuronale. On pourrait aussi associer des nanoparticules à des colorants organiques, classiques ou obtenus par génie génétique, pour produire des molécules hybrides où une nanoparticule servirait d'antenne pour amplifier les faibles signaux produits par des colorants fluorescents, au moment où un neurone est activé.

Un autre défi technique que pose la visualisation de l'activité neuronale est la difficulté de transmettre de la lumière aux circuits neuronaux situés loin de la surface du cerveau et de collecter celle qu'ils émettent. Pour résoudre ce problème, les spécialistes de neurotechnologie commencent à collaborer avec des chercheurs d'autres domaines qui ont eux aussi besoin de voir à travers des objets solides de façon non invasive, qu'il s'agisse de la peau, du crâne ou de l'intérieur d'une puce d'ordinateur.

Les scientifiques savent depuis longtemps qu'une partie de la lumière qui atteint un objet est diffusée, et que les photons diffusés peuvent, en principe, révéler des détails de l'objet.

Par exemple, la lumière d'une lampe électrique placée d'un côté de la main traverse cette dernière et ressort sous la forme d'une lueur diffuse, sans donner d'indication sur la localisation des os ou des vaisseaux sanguins. Mais les informations sur le chemin qu'emprunte la lumière à travers la main ne sont pas totalement perdues. Les ondes lumineuses désordonnées diffusent, puis interfèrent les unes avec les autres. De nouvelles méthodes de calcul permettent, à partir de la lumière diffusée, de reconstruire une image de ce qui se trouve à l'intérieur. Par exemple, Rafael Piestun et ses collègues, à l'Université du Colorado, ont utilisé cette technique pour voir à travers un matériau opaque. Ces méthodes pourraient également être combinées avec d'autres techniques optiques, notamment celles utilisées par les astronomes pour corriger



2. UNE VUE DORSALE ET LATÉRALE de l'activité cérébrale de la larve (transparente) du poisson zèbre, dont le cerveau compte 100 000 neurones environ. Les neurones ont été génétiquement modifiés de façon qu'ils deviennent fluorescents lorsque les ions calcium pénètrent dans la cellule neuronale à la suite de son activation. Cette technique de visualisation de l'activité cérébrale est nommée imagerie calcique.

es distorsions de la lumière des étoiles ntroduites par l'atmosphère. L'optique dite omputationnelle aiderait ainsi à visualiser a lueur fluorescente émanant de colorants ui s'éclairent quand les neurones situés n profondeur s'activent.

Certaines de ces nouvelles techniques ptiques ont déjà été utilisées avec succès our visualiser, à plus d'un millimètre de rofondeur, l'intérieur du cerveau chez animal ou chez l'homme, après retrait l'un morceau de la boîte crânienne. Un eu plus perfectionnées, ces techniques ffriraient un moyen de voir à travers épaisseur du crâne.

Toutefois, l'imagerie optique trans-rânienne ne permettra pas de pénétrer uffisamment pour détecter des structures situées en profondeur. Une autre invention écente permet d'aborder ce problème : la micro-endoscopie. Cette technique consiste insérer un tube étroit mais flexible dans artère fémorale, puis à le guider vers ne autre partie du corps, par exemple e cerveau, qui sera exploré à l'aide des guides lumineux microscopiques insé-és dans le tube. En 2010, une équipe de Institut Karolinska à Stockholm a fait a démonstration d'un « extroducteur », n dispositif permettant de perforer en oute sécurité l'artère ou la veine dans aquelle se faufile l'endoscope, ce qui rend ccessible à l'inspection n'importe quelle artie du cerveau, et pas seulement son ystème vasculaire.

De l'ADN pour révéler l'activité d'un neurone ?

Les électrons et les photons sont les candidats es plus évidents pour enregistrer l'activité lectrique cérébrale, mais ce ne sont pas les euls. Dans un futur encore éloigné, l'ADN ourrait aussi jouer un rôle essentiel dans analyse de l'activité neuronale, comme le uggère une étude du laboratoire de l'un de ous (G. Church), publiée en 2012.

L'idée est de modifier génétiquement es animaux de laboratoire pour que leurs eurones synthétisent une « bande d'enre-gistrement moléculaire », une molécule qui change de façon particulière et détectable quand le neurone s'active. Selon l'un des scénarios envisagés, la bande d'enregis-trement serait synthétisée par une enzyme nommée ADN polymérase. Cette enzyme commencerait par fabriquer en continu un long brin d'ADN qui se lie à un autre brin composé d'une séquence préétablie de nucléotides (les « lettres » qui forment les éléments constitutifs de l'ADN). Un afflux d'ions calcium, dû à l'activation d'un neu-rone, entraînerait alors la production par la polymérase d'une séquence différente de lettres, autrement dit des « erreurs » dans le placement prévu des nucléotides.

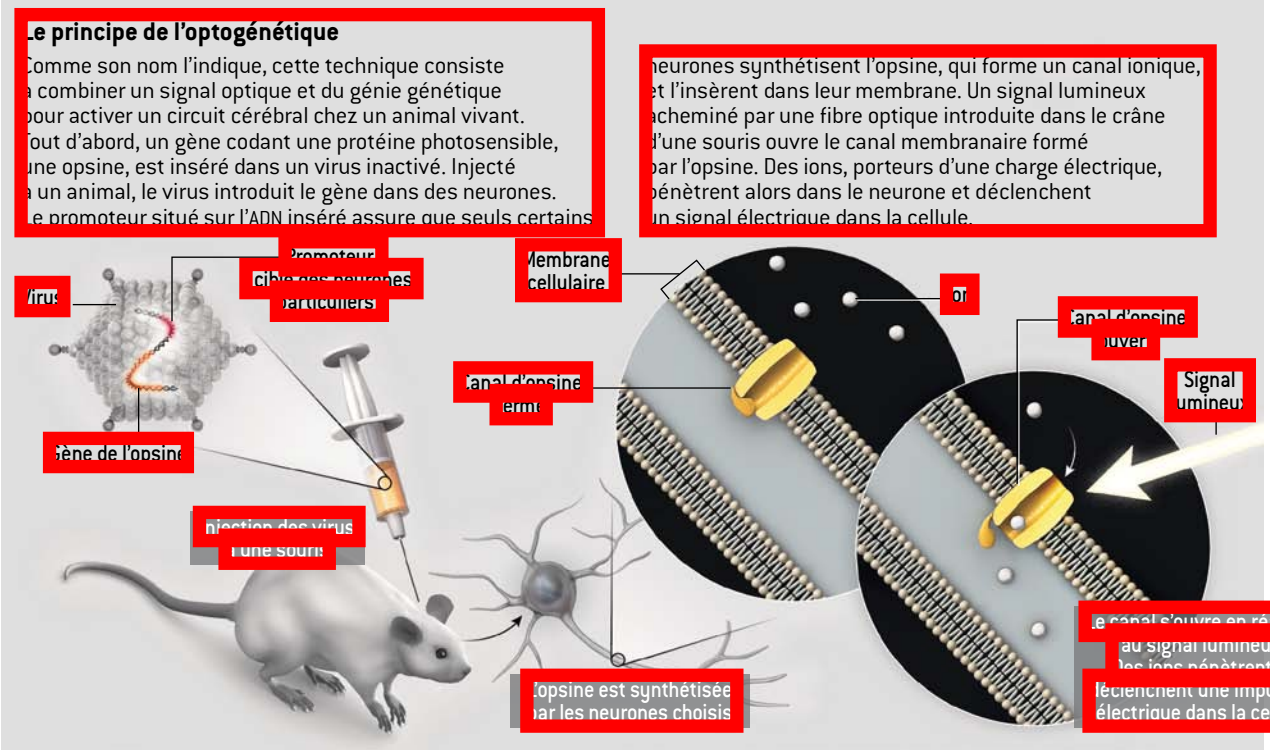
Le séquençage du double brin de nucléotides qui en résulterait fournirait, par une technique innovante, le « séquen-çage fluorescent *in situ* », l'enregistrement des différents changements, c'est-à-dire des erreurs par rapport à la bande d'enregis-trement d'origine, qui correspondent soit à l'intensité, soit au moment de l'activation de chacun des neurones d'un tissu cérébral.

INSTALLER UN INTERRUPTEUR NEURONAL A FONCTIONNEMENT OPTIQUE

Au-delà de l'observation des signaux électriques qui passent dans les circuits, les neurobiologistes cherchent de plus en plus à activer et éteindre à volonté des circuits individuels, afin d'apprendre à contrôler des formes particulières d'activité cérébrale. Ces techniques, dont deux reposent sur des signaux optiques *(ci-dessous)*, sont encore balbutiantes, mais pourraient un jour aider à supprimer les crises d'épilepsie ou les tremblements de la maladie de Parkinson.

Le principe de l'optogénétique

Comme son nom l'indique, cette technique consiste à combiner un signal optique et du génie génétique pour activer un circuit cérébral chez un animal vivant. Tout d'abord, un gène codant une protéine photosensible, une opsine, est inséré dans un virus inactivé. Injecté à un animal, le virus introduit le gène dans des neurones. Le promoteur situé sur l'ADN inséré assure que seuls certains neurones synthétisent l'opsine, qui forme un canal ionique, et l'insèrent dans leur membrane. Un signal lumineux acheminé par une fibre optique introduite dans le crâne d'une souris ouvre le canal membranaire formé par l'opsine. Des ions, porteurs d'une charge électrique, pénètrent alors dans le neurone et déclenchent un signal électrique dans la cellule.



De telles manipulations relèvent de la biologie de synthèse, domaine où les chercheurs se servent des matériaux biologiques un peu comme des pièces d'une machine. Dans un registre similaire, on envisage la possibilité de créer des cellules artificielles se comportant comme des sentinelles biologiques. Une cellule obtenue par génie génétique pourrait servir d'électrode biologique d'un diamètre inférieur à celui d'un cheveu, que l'on pourrait placer près d'un neurone et qui détecterait son activation. Un nanocircuit intégré à l'intérieur de la cellule artificielle enregistrerait les activations du neurone et transmettrait à un ordinateur les données recueillies à l'aide d'une liaison sans fil.

Ces dispositifs nanométriques, qui combinent des composants électroniques et biologiques, pourraient être alimentés de l'extérieur par des ultrasons, voire de l'intérieur de la cellule par du glucose, de l'ATP ou une autre molécule.

Pour comprendre ce qui se passe dans le vaste réseau des circuits cérébraux, il ne suffit pas d'avoir des images. Il faudra avoir la possibilité d'activer ou d'inhiber à volonté certains groupes de neurones pour tester ce que font ces cellules. L'optogénétique, technique qui s'est beaucoup répandue ces dernières années, consiste à modifier génétiquement des animaux de façon à ce que leurs neurones produisent des protéines photosensibles. Exposées à la lumière d'une longueur d'onde particulière, acheminée au neurone par une fibre optique, ces protéines peuvent soit activer ce dernier, soit l'éteindre.

Des interrupteurs contrôlés par la lumière

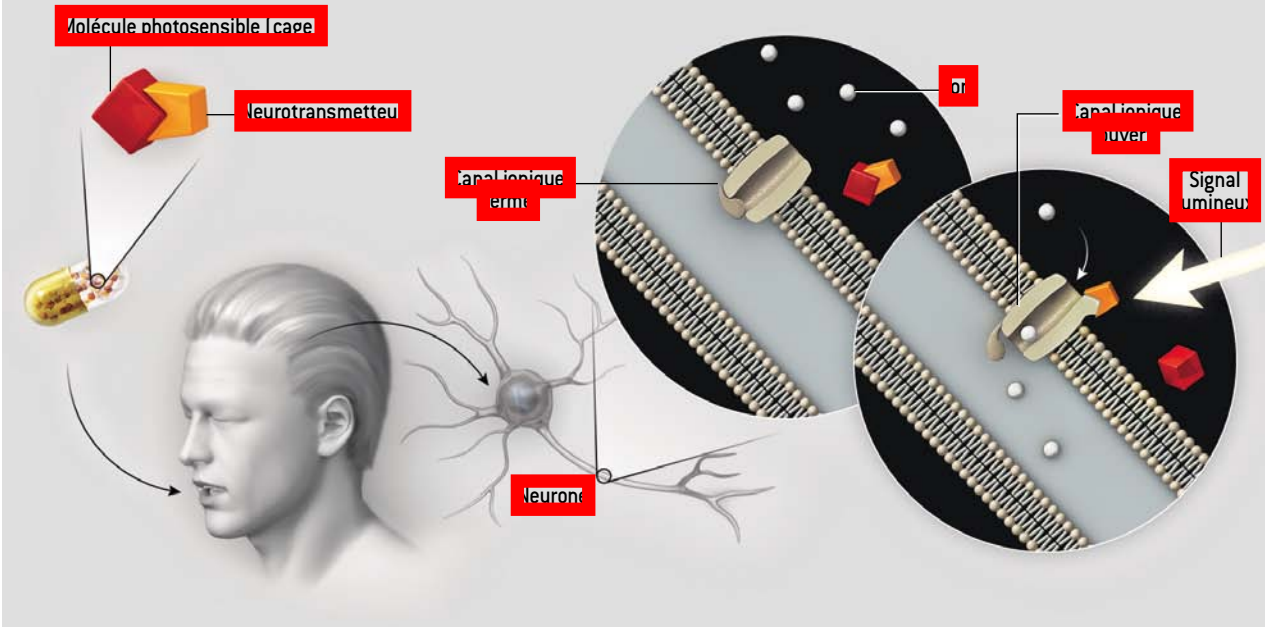
L'optogénétique a été utilisée par des chercheurs pour activer des circuits neuronaux impliqués par exemple dans le plaisir ou dans les troubles moteurs de la maladie de Parkinson. On a même réussi, par cette technique, à « implanter » de faux souvenirs à des souris.

En raison de son recours au génie génétique, l'optogénétique nécessitera de longues procédures d'autorisation avant de pouvoir être testée ou utilisée à titre thérapeutique chez l'être humain. Une alternative plus pratique pour certaines applications a été démontrée en insérant des neurotransmetteurs, des molécules qui régulent l'activité des neurones, dans des « cages » chimiques photosensibles. Exposée à la lumière, la cage se rompt et le neurotransmetteur qu'elle contient s'en échappe et agit.

En 2012, Steven Rothman, de l'Université du Minnesota, en collaboration avec le laboratoire de R. Yuste, a placé des cages de ruthénium contenant du GABA, un neurotransmetteur qui diminue l'activité neuronale, sur le cortex cérébral de rats chez qui l'on déclenchait, par des moyens chimiques, des crises d'épilepsie. Une impulsion de lumière bleue dirigée sur le cerveau libérait le GABA et avait pour effet d'atténuer les crises. Des approches « optochimiques » similaires sont actuellement utilisées pour explorer la fonction de certains circuits neuronaux. Développées plus avant, elles pourraient être mises

Le principe de l'optochimie

Une technique alternative, nommée optochimie, évite le recours à de lourdes techniques de génie génétique. Un patient prendrait d'abord un comprimé contenant une molécule photosensible en forme de cage, à laquelle est attaché un neurotransmetteur, qui régule l'activité neuronale. À l'arrivée du contenu du comprimé dans le cerveau, une impulsion lumineuse émise par un endoscope détacherait le neurotransmetteur, qui se fixerait alors sur un canal de la membrane cellulaire et l'ouvrirait pour laisser entrer des ions. Ces derniers déclencheraient ensuite l'activation du neurone, où une impulsion électrique se propagerait alors.



en œuvre pour soigner certains troubles neurologiques ou mentaux.

La route est encore longue entre la recherche fondamentale et les applications cliniques. Chacune des nouvelles idées pour réaliser des mesures à grande échelle et manipuler l'activité neuronale devra être testée sur les drosophiles, les nématodes et les rongeurs, avant de passer à l'être humain. Grâce à d'intenses efforts, les chercheurs pourront, d'ici cinq ans peut-être, visualiser et contrôler par des moyens optiques une bonne partie des quelque 100 000 neurones du cerveau d'une drosophile.

La technologie permettant d'enregistrer et de moduler l'activité neuronale d'une souris éveillée pourrait ne pas être disponible avant dix ans. Certaines techniques, telle l'utilisation d'électrodes fines pour corriger des dysfonctionnements dans les circuits neuronaux de patients déprimés ou épileptiques, pourraient intégrer la pratique médicale au cours des prochaines années, tandis que pour d'autres, il faudra une décennie ou plus.

À mesure du progrès des nanotechnologies, les chercheurs devront améliorer la gestion et le partage d'énormes masses de données. L'imagerie de l'activité de tous les neurones du cortex d'une souris engendrerait quelque 300 téraoctets de données compressées par heure. Ce n'est pas insurmontable. De grandes structures de recherche, analogues aux observatoires astronomiques, aux centres de génomique et aux accélérateurs de particules, pourraient acquérir, intégrer et distribuer ces flux de données numériques. Tout comme le Projet du génome humain a donné naissance au domaine de la bio-informatique pour faire face aux données du séquençage, les neurosciences computationnelles pourraient décoder les fonctionnements de systèmes nerveux entiers.

La capacité d'analyser des masses gigantesques de données préparerait le terrain à de nouvelles théories sur la façon dont la cacophonie apparente des activations neuronales se traduit par des perceptions, de l'apprentissage et de la mémorisation. Cela aiderait aussi à confirmer ou écarter des théories qui n'ont pas pu être testées auparavant. D'après l'une des théories avancées, les nombreux neurones qui participent à l'activité d'un circuit développent au fil du temps des séquences particulières d'activation, nommées attracteurs, qui seraient la base d'états cérébraux émergents – une pensée, un souvenir ou une décision.

L'imagerie de l'activité de tous les neurones du cortex d'une souris engendrerait quelque 300 téraoctets de données compressées par heure.

Une meilleure compréhension des circuits neuronaux permettrait d'améliorer le diagnostic de troubles tels que la maladie d'Alzheimer et l'autisme, et de mieux connaître leurs causes. Cela aura sans doute des conséquences économiques positives sur la médecine et les biotechnologies. Comme pour le projet du génome humain, des questions éthiques et juridiques se poseront, en particulier si ces recherches conduisent à la possibilité de discerner ou de modifier les états mentaux – ce qui exigera de recueillir le consentement des patients et de respecter leur vie privée.

Pour que les diverses initiatives concernant le cerveau aboutissent, les scientifiques et leurs commanditaires doivent cependant rester centrés sur l'objectif de l'imagerie et de la manipulation de circuits neuronaux. L'idée de l'initiative BRAIN est née d'un article publié dans la revue *Neuron* en juin 2012, dans lequel, avec nos collègues, nous suggérions une collaboration durable entre physiciens, chimistes, nanoscientifiques, biologistes moléculaires et neuroscientifiques pour développer une « carte de l'activité cérébrale » issue de nouvelles techniques permettant de mesurer et contrôler l'activité de circuits cérébraux entiers.

À mesure de l'avancée du projet BRAIN, il convient de garder le cap initial, à savoir le développement d'outils. Les recherches sur le cerveau constituent un domaine très vaste et l'initiative BRAIN pourrait facilement se transformer en une liste de souhaits hétéroclites visant à satisfaire les intérêts particuliers des nombreuses sous-disciplines des neurosciences. Elle pourrait ainsi se réduire à un simple financement supplémentaire de ce domaine. Dans ce cas, les progrès se feraient au hasard et des défis techniques majeurs pourraient ne jamais être relevés.

La mise au point d'instruments visualisant l'activité électrique de millions de neurones de régions cérébrales entières ne pourra se faire qu'au prix d'un effort soutenu d'une vaste équipe pluridisciplinaire de chercheurs. Les techniques ainsi développées pourront alors être mises au service de la communauté des neurosciences, de la même façon que le sont les observatoires pour les astronomes.

Nous sommes convaincus que sans ces nouveaux outils, la science du cerveau ne pourra guère progresser.

BIBLIOGRAPHIE

- R. Insel *et al.*, **The NIH BRAIN Initiative**, *Science*, vol. 340, pp. 687-688, 2013.
- A. P. Alivisatos *et al.*, **Nanotools for neuroscience and brain activity mapping**, *ACS Nano*, vol. 7(3), pp. 1850-1866, 2013.
- M. B. Ahrens *et al.*, **Whole-brain functional imaging at cellular resolution using light-sheet microscopy**, *Nature Methods*, vol. 10, pp. 413-420, 2013.
- A. P. Alivisatos *et al.*, **The brain activity map project and the challenge of functional connectomics**, *Neuron*, vol. 74(6), pp. 970-974, 2012.

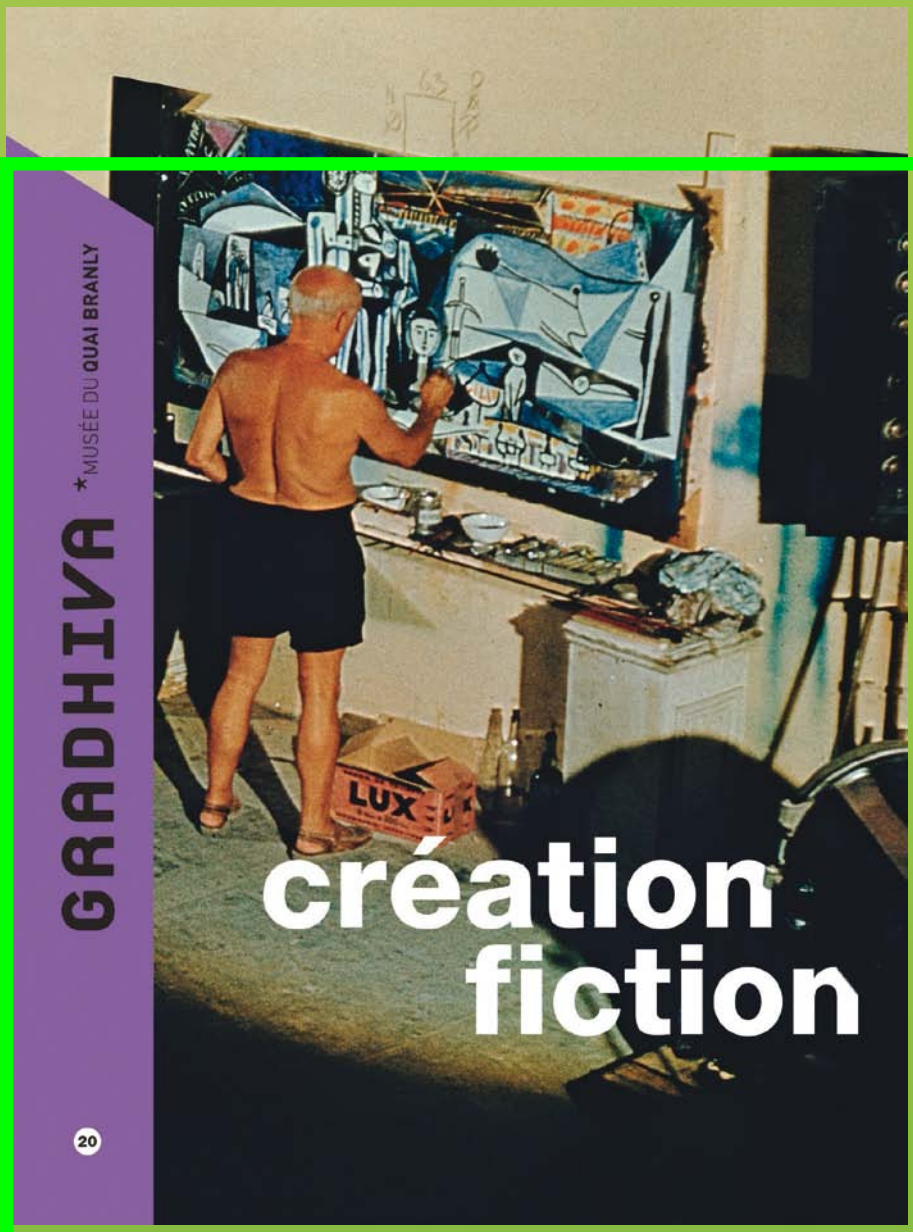
MUSÉE DU **QUAI BRANLY**

là où dialoguent les cultures

LA REVUE GRADHIVA

EN VENTE EN LIBRAIRIE LE 24/09/14

ET EN LIGNE SUR http://www.librairie-epona.fr/revues/gradhiva.html



création fiction

Coordonné par Daniel Fabre

Ce numéro de Gradhiva traite du rapport complexe entre création et fiction. Il vise à éclairer le processus créateur en s'interrogeant sur la diversité des modalités par lesquelles les créateurs l'envisagent pour eux-mêmes et sur sa mise en abyme par d'autres artistes, plasticiens, écrivains ou cinéastes. Les articles réunis dans ce dossier explorent comment création et fiction s'entrelacent : par inclusion lorsque l'œuvre elle-même expose la fiction de sa propre création (Francis Ponge dans la *Fabrique du Pré*), par débordement lorsque processus créateur et œuvre deviennent indissociables d'une forme de vie (Marcel Proust ou Pier Paolo Pasolini) sans oublier par intromission du pouvoir (telle l'apparition au XVII[e] siècle, de nouvelles figures de poètes, enfants ou artisans louant la grandeur du souverain). On y découvre également comment création et fiction se réverbèrent : dans la mise en scène de l'artiste au travail (*Le mystère Picasso* de Georges-Henri Clouzot) ; dans la restitution au cinéma d'une passion créatrice (*Séraphine* de Martin Provost) ; par le dialogue, sur la création d'une œuvre particulière (les romans de Philippe Dagen sur des artistes) ou encore à travers l'exploration littéraire d'œuvres plastiques (Pierre Michon). Ce volume offre un éventail d'études qui engage l'anthropologie des processus créateurs sur de nouvelles voies.

Retrouvez tous les numéros de GRADHIVA sur **www.quaibranly.fr/gradhiva**

La ruée vers le nano-or

Delphine Schaming, Olivier Pluchery et Hund Remita

Quand l'or prend la forme de particules nanométriques, ses propriétés physico-chimiques et sa couleur changent. Ces nanoparticules sont promises à de nombreuses applications, notamment dans le traitement des cancers.

Électronique moléculaire, optique, traitements anticancéreux, vêtements de haute technologie, pots catalytiques... Il suffit de faire une recherche « nanoparticules d'or » sur Internet pour comprendre que de minuscules particules d'or sont de plus en plus employées dans divers domaines technologiques et qu'elles pourraient un jour changer notre vie.

Il s'agit de nanoparticules, c'est-à-dire des particules d'or d'échelle nanométrique. Le nanomètre, rappelons-le, est le milliardième de mètre (10^{-9} mètre). En pratique, on a pris l'habitude de qualifier de nano- tout objet de dimension inférieure à 100 nanomètres, et l'on nomme or colloïdal une suspension de nanoparticules d'or dans un liquide.

Pourquoi ces nanoparticules d'or ou l'or colloïdal sont-ils intéressants ? Cela tient à leurs propriétés optiques, physiques et chimiques. À l'échelle nanométrique, qui est l'échelle immédiatement supérieure à celle des interactions moléculaires, ces propriétés diffèrent de celles de l'or plus massif. De plus, la petite taille des particules permet de les introduire dans la matière ou un organisme afin d'exploiter ces propriétés. Nous allons expliquer ici les particularités que présentent les « nanopépites » d'or, puis nous détaillerons quelques-unes de leurs plus prometteuses applications.

Des propriétés optiques particulières

L'humanité exploite les propriétés particulières de l'or depuis la plus haute antiquité. Comme ce métal jaune ne s'oxyde pas, il est depuis toujours une matière précieuse, pour les joailliers notamment. Chose surprenante, l'or nanométrique aussi est exploité depuis longtemps. Ainsi, une coupe romaine en verre opacifié datant du IVe siècle de notre ère, la coupe de Lycurgue, constitue l'exemple ancien d'emploi de nanoparticules d'or le plus célèbre. Conservée au *British Museum*, à Londres, cette coupe est dichromatique, c'est-à-dire qu'elle change de couleur selon son éclairage. Ainsi, elle apparaît rouge translucide lorsqu'elle est éclairée de l'intérieur, alors qu'elle est verte opaque lorsqu'elle est éclairée de l'extérieur *(voir l'encadré page 35)*.

Ce changement de couleur découle des propriétés optiques particulières qu'acquiert un objet métallique de taille très inférieure à la longueur d'onde de la lumière. Voyons pourquoi.

Rappelons qu'une onde lumineuse est une onde électromagnétique, constituée d'un champ électrique et d'un champ magnétique oscillants se propageant de concert. Les directions de ces deux champs s'inversent toutes les demi-longueurs d'onde. Les longueurs d'onde de la lumière visible s'échelonnant entre 400 et 800 nanomètres, cela signifie que la direction du champ électrique de l'onde lumineuse s'inverse au bout d'une distance comprise entre 200 et 400 nanomètres.

Tous les électrons libres d'une nanoparticule métallique éclairée par de la lumière visible subissent donc à chaque instant pratiquement le même champ électrique, puisque la particule mesure une centaine de nanomètres au plus. Ces électrons de conduction se mettent donc à osciller en phase avec le champ électrique de l'onde lumineuse *(voir la figure 1)*, c'est-à-dire à son rythme, qui

est de l'ordre de 10^{15} hertz. Ils ne sont imités dans leurs mouvements que par es bords de la nanoparticule.

Comme tout système oscillant, cet ensemble d'électrons a une fréquence de ésonance : la fréquence dite de résonance lasmon. Quand la fréquence lumineuse ui est égale, l'entrée en résonance du sys- ème constitué par les électrons de surface scillants se traduit par une forte absorption le l'onde lumineuse incidente.

La fréquence de résonance dépend de a nature métallique de la nanoparticule, de a forme et de sa taille. Dans le cas de nano- particules d'or sphériques en suspension lans de l'eau, la résonance se produit pour les longueurs d'onde voisines de 520 nano- mètres (ce qui correspond à $0{,}6 \times 10^{15}$ hertz), oit du vert. La couleur observée étant com- plémentaire de la couleur absorbée, les anoparticules apparaissent rouges.

Pour la même raison, les nanoparticules d'argent sphériques apparaissent jaunes avec une longueur d'onde de résonance lasmon vers 400 nanomètres), tandis que es nanoparticules d'or non sphériques, par exemple en forme de bâtonnets, peuvent uivant leurs formes et leurs dimensions revêtir toute une gamme de couleurs.

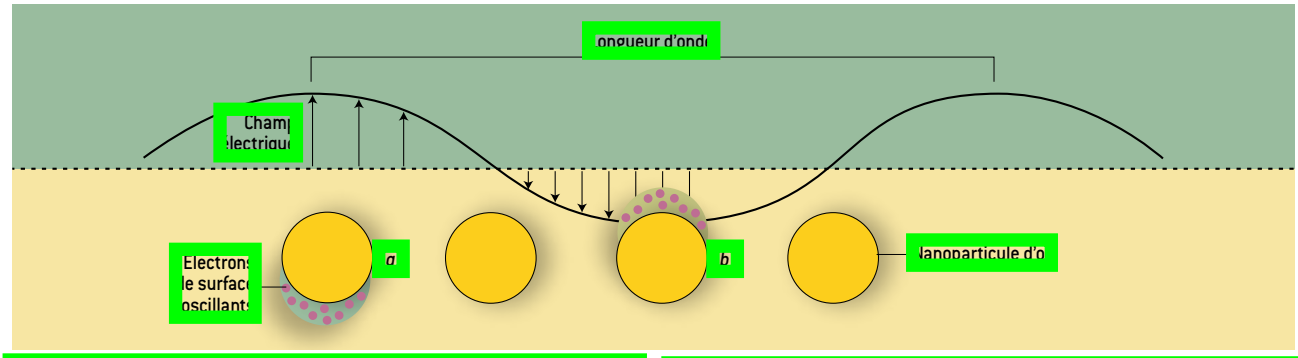
Dans le cas de nanoparticules d'une cen- aine de nanomètres, la diffusion de la lumière n'est plus négligeable devant son absorption. C'est pourquoi la coupe de Lycurgue appa- raît différente suivant qu'elle est éclairée de l'intérieur (l'absorption domine) ou de 'extérieur (la diffusion domine).

Outre ces propriétés optiques, les nano- particules d'or ont aussi un grand intérêt pour la chimie : elles catalysent de nom- breuses réactions, c'est-à-dire qu'elles les facilitent ou les accélèrent. Les catalyseurs sont très utilisés dans l'industrie. Comme e catalyseur est régénéré au cours de la réaction, il peut resservir des centaines de fois, et agit en faible quantité (un atout dans le cas de l'or !).

Dans la majorité des cas, les catalyseurs sont solides et les réactions chimiques ont ieu à leur surface. On parle alors de cata- lyse hétérogène car les réactifs sont dans une phase liquide ou gazeuse. La catalyse est d'autant plus efficace que la surface de réaction est grande. Ainsi, pour limiter la quantité de matériau catalyseur à utiliser

L'ESSENTIEL

- L'or est inerte à l'état massif, mais pas à l'état de particules de taille nanométrique.
- Sous cette forme, l'or a des propriétés physiques et catalytiques intéressantes.
- Faciles à introduire dans un organisme, les nanoparticules d'or pourraient améliorer les traitements contre les cancers.
- Elles peuvent aussi dépolluer des gaz, servir à détecter des molécules ou des bactéries, etc.
- Leurs premières applications concrètes apparaissent.



1. UNE ONDE LUMINEUSE est formée d'un champ magnétique et d'un champ électrique qui se propagent dans l'espace en oscillant. Comme tout champ électrique, celui d'une onde lumineuse repousse les charges électriques négatives quand il est positif *(a)*, par exemple celles des électrons, ou les attire quand il est négatif *(b)*. À la surface de nanoparticules métalliques éclairées par une onde lumineuse, les électrons oscillent au même rythme que le champ électrique associé à la lumière.

et le coût, il faut choisir un matériau de façon à ce qu'il ait une surface spécifique (surface par unité de volume) très élevée. Comme le rapport surface/volume d'un objet est inversement proportionnel à sa taille, les matériaux catalytiques mis sous la forme de nanoparticules ont une très grande surface spécifique, ce qui augmente beaucoup leur efficacité.

Un autre effet géométrique intervient. Dans la masse du matériau, chaque atome d'or a 12 voisins immédiats ; on dit que le nombre de coordination est 12, nombre qui est déterminé par la structure cristalline. En surface, en revanche, les atomes ont moins de voisins : sur un cube par exemple, ceux des faces n'en ont que 9, ceux des arêtes seulement 7 et les atomes situés sur un coin n'en ont que 6.

Plus une particule est petite, plus la proportion des atomes de surface augmente par rapport à celle des atomes de volume ; il y aussi augmentation de la proportion des sites de basse coordination (coins, arêtes). Or ces sites de basse coordination présentent, en général, une réactivité plus élevée que les sites sur les plans, en raison de la propension des atomes à combler le manque de liaisons.

Ces effets géométriques expliquent en partie pourquoi les nanoparticules d'or ont un plus grand pouvoir catalytique que l'or massif. Mais un autre facteur joue aussi dans cette différence de réactivité. Il s'agit d'un effet relativiste (s'expliquant à l'aide de la théorie de la relativité restreinte d'Einstein) qui se traduit par une contraction de certaines couches électroniques, ou « orbitales », de l'atome. Or les principales propriétés physico-chimiques d'un élément sont données par la structure de ses orbitales les plus externes. L'organisation périodique des orbitales est à l'origine de la répartition des éléments dans le tableau de Mendeleïev. Les éléments d'une même colonne ont des propriétés similaires. Mais cette règle n'est plus tout à fait respectée pour les éléments lourds, du fait des effets relativistes.

Pour décrire les orbitales, il faut utiliser des calculs quantiques relativistes. Et les effets relativistes sont particulièrement importants pour l'or. De quoi s'agit-il précisément ? L'or est un gros atome. Il est constitué d'un noyau de 79 protons et 118 neutrons, et de 79 électrons. Le nombre important de protons oblige les électrons à se déplacer à des vitesses proches de celle de la lumière. L'effet relativiste de « contraction des longueurs » tend alors à réduire la taille des orbitales atomiques. Les calculs des orbitales de valence – auxquelles est due la réactivité d'un atome – de l'or montrent que cet effet relativiste est très fort pour l'orbitale *6s*, la plus externe. *A priori*, l'électron évoluant sur une orbitale *6s* est le plus externe du nuage électronique de l'atome d'or ; mais du fait que cette orbitale est sphérique, il a une probabilité importante de se trouver près du noyau, où les effets de contraction relativiste sont importants. Si l'on compare avec les électrons de l'orbitale *5d*, qui forme des lobes avec une probabilité de présence nulle près du noyau, les effets de contraction relativiste de l'orbitale sont moindres et peuvent être perçus comme une dilatation, un effet dit indirect *(voir la figure 2)*.

On montre que l'un des effets de la contraction de l'orbitale *6s* est de rendre l'or plus électronégatif, c'est-à-dire davantage apte à attirer des électrons. Elle rend même l'or plus électronégatif que l'oxygène. C'est pourquoi l'or ne forme pas de molécules d'oxyde avec l'oxygène, car elles seraient instables.

Cependant, quand l'or est sous forme macroscopique, les orbitales externes de chacun des atomes fusionnent pour former un ensemble nommé « bande de conduction », qui fait de ce métal l'excellent conducteur électrique que l'on sait. Ce comportement collectif des atomes d'or domine sur leur comportement individuel, y compris chez les atomes situés en surface. La raison pour laquelle les nanoparticules d'or sont plus réactives que l'or macroscopique est là.

C'est en 1987 que l'équipe de Masatake Haruta, de l'Université métropolitaine de Tokyo, a révélé le pouvoir catalytique de l'or nanométrique, après avoir synthétisé sur des supports de dioxyde de titane (TiO_2) des particules d'or assez petites. Les chercheurs ont constaté que des nanoparticules de moins de cinq nanomètres de diamètre peuvent catalyser efficacement à température ambiante la réaction d'oxydation du très toxique monoxyde de carbone (CO) en dioxyde de carbone (CO_2). L'efficacité de cette catalyse ne dépend pas seulement de la taille des particules, mais aussi du support sur lequel elles sont synthétisées. Dans la réaction en question, les meilleurs supports sont du dioxyde de titane ou de l'oxyde de fer, Fe_2O_3.

Les effets géométriques expliquent en partie pourquoi les particules d'or ont un plus grand pouvoir catalytique que l'or massif

La découverte de cette catalyse est prometteuse pour se débarrasser du gaz toxique qu'est le monoxyde de carbone à température ambiante dans les pots catalytiques des voitures. Aujourd'hui, ces pots catalytiques fonctionnent grâce à des nanoparticules de platine, de palladium et de rhodium, déposées sur de la cérine (oxyde de cérium) et de l'alumine (oxyde d'aluminium). Le passage des gaz d'échappement dans le pot permet d'oxyder le monoxyde de carbone, de réduire les oxydes d'azote (NO_x) et de brûler les hydrocarbures (non totalement brûlés lors de la combustion de l'essence). Cependant, les nanoparticules de platine servant à l'oxydation du monoxyde de carbone ne sont efficaces qu'à plus de 300 °C ; de ce fait, tant que le moteur est encore froid, les voitures polluent beaucoup…

Dans l'industrie automobile, le pas vers les nanoparticules d'or n'a pas encore été franchi. Il l'a été en revanche par un laboratoire taïwanais, qui a mis sur le marché des masques respiratoires à base de nanoparticules d'or pour protéger les pompiers contre les intoxications au monoxyde de carbone.

Des masques pour protéger les pompiers

Il l'a aussi été dans l'industrie chimique, des nanoparticules d'or étant aujourd'hui employées pour catalyser de nombreuses réactions de chimie organique.

Les nanoparticules d'or pourraient aussi améliorer l'efficacité de la radiothérapie des tumeurs cancéreuses. Cette méthode consiste à irradier la tumeur avec des rayonnements ionisants très énergétiques (rayons X, rayons γ, protons ou ions carbone accélérés) afin de la détruire. Mais l'irradiation, même appliquée localement, détruit aussi les cellules saines situées à proximité des cellules cancéreuses. Dès 2004, des recherches menées par James Hainfeld, du Laboratoire américain de Brookhaven, et par Henry Smilowitz, de l'Université du Connecticut, ont montré que l'injection intraveineuse de nanoparticules d'or au niveau des cellules tumorales améliore l'efficacité du traitement aux rayons X (*voir la figure 3*). Récemment, des équipes de recherche à l'Université Paris-Sud ont obtenu des résultats similaires *in vitro* avec des nanoparticules de platine et de gadolinium.

Les nanoparticules d'or dans l'histoire

La coupe de Lycurgue présente un bichromatisme – elle est rouge quand elle est éclairée de l'intérieur (*voir l'illustration*), verte quand elle est éclairée de [illegible], grâce à un examen au microscope et aux rayons X.

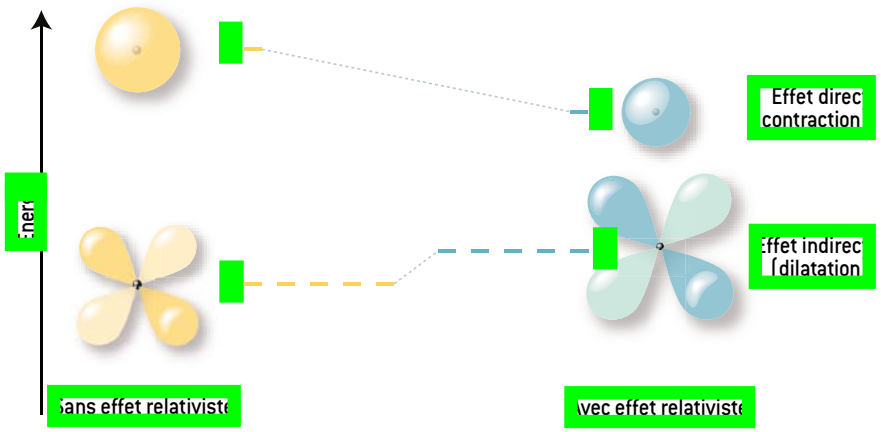
On a ainsi mis en évidence des nanoparticules d'un alliage d'or et d'argent de quelques dizaines de nanomètres de diamètre et des traces de cuivre. Leur présence est due à l'utilisation, dans la pâte de verre, de sels métalliques d'ions d'or (Au^{3+}), d'argent (Ag^{+}) et de cuivre (Cu^{2+}), qui, réduits grâce à la présence probable d'antimoine (qui était utilisé d'abord pour opacifier le verre) dans la pâte de verre, ont précipité et formé de petits agrégats.

Si l'obtention de l'effet bichromatique à l'aide de particules d'or est rare, celle de la couleur rouge rubis grâce à des nanoparticules d'autres métaux est courante. De même, les vitraux rouges et jaunes des églises médiévales étaient en général obtenus grâce à des nanoparticules, de cuivre pour les premiers et d'argent pour les seconds.

Les premiers de ces verres colorés ont été obtenus par hasard. Une formule précise est décrite au XVII^{e} siècle par un certain Cassius, dans son traité d'alchimie *De Auro*. Il y écrivit notamment qu'il était possible d'obtenir une couleur pourpre à partir d'or métallique dissous dans un premier temps dans de l'eau régale (mélange d'acide nitrique et d'acide chlorhydrique), puis « précipité » dans une solution de chlorure d'étain.

Alors que les maîtres verriers auraient été bien en peine de donner une explication scientifique à l'obtention de cette couleur, nous savons à présent que le mélange d'acide, très corrosif, permet d'oxyder l'or métallique en ions métalliques, et que ces ions sont ensuite réduits par l'étain, ce qui produit des nanoparticules métalliques. De nos jours, on obtient encore des nanoparticules d'or à partir d'ions Au^{3+} réduits en atomes d'or qui s'agrègent en petits amas, même si des méthodes physiques d'obtention à partir de l'or massif existent aussi.

Dès le XVII^{e} siècle, la production de verres rouge rubis se fait à grande échelle dans différentes manufactures de verre en Europe, puis la technique se répand à travers le monde avant d'être adaptée à la production d'émail rouge pour la coloration de céramiques. Ainsi, dans la Chine de la dynastie Qing au XVIII^{e} siècle, on met à profit le procédé pour colorer la *Famille rose*, un type de porcelaine. À la même époque, la Manufacture royale de Sèvres produit aussi les porcelaines roses de la collection *Rose Pompadour*, tandis que les verriers vénitiens en font parfois usage. Aujourd'hui encore, la cristallerie *Baccarat* ou certains parfumeurs colorent ainsi certains récipients.



2. DANS UN ATOME LOURD, LES ELECTRONS en orbite près du noyau atteignent des vitesses proches de celles de la lumière. Les effets prévus par la théorie de la relativité ne sont alors plus négligeables. Selon la valeur du moment cinétique associé à l'orbite, cet effet relativiste contracte ou dilate les orbitales électroniques *(ci-dessus visualisées par des lobes)*, c'est-à-dire la répartition spatiale de la probabilité de présence de l'électron. La contraction des orbitales notées *s*, c'est-à-dire de moment cinétique orbital nul, est particulièrement forte. Les orbitales *d* sont moins contractées, ce qui est perçu comme une dilatation dite indirecte. Ainsi l'écart entre les orbitales *s* et *d* passe de 4 électronvolts à 2,4 électronvolts quand on tient compte des effets relativistes.

Pourquoi les nanoparticules ont-elles cet effet ? Lorsqu'ils subissent un rayonnement ionisant, les atomes d'or (ou de platine) émettent certains de leurs électrons internes : c'est l'effet Auger. Or les électrons Auger, eux-mêmes des particules chargées, arrachent à leur tour d'autres électrons appartenant aux atomes voisins dans la nanoparticule. De proche en proche, toute une cascade électronique se forme. Cela entraîne une décomposition de molécules de l'eau environnante en radicaux oxydants OH, qui amplifient les effets du rayonnement ionisant incident.

Il est ainsi possible d'obtenir les effets destructeurs recherchés sur les tissus cancéreux tout en diminuant l'énergie du rayonnement incident, afin de moins toucher les tissus sains voisins. Cette technique conduit donc à une meilleure précision spatiale de l'irradiation destructrice ainsi qu'à un meilleur taux de destruction des cellules cancéreuses.

Toujours dans le domaine de la thérapie anticancéreuse, les nanoparticules d'or pourraient aussi servir à détruire les tumeurs par photothermie. Les cellules humaines ont en effet la propriété de s'autodétruire spontanément quand elles sont soumises à des températures dépassant de six à huit degrés les 37 °C. Les cellules cancéreuses sont encore plus sensibles à une telle hausse de la température. En 2008, Mostapha El-Sayed, de l'Institut *Georgia Tech*, et Naomi Halas, de l'Université Rice, aux États-Unis, ont positionné près de cellules tumorales des nanoparticules d'or, avant de les faire chauffer à l'aide d'un laser. Ces recherches ont établi qu'un réglage approprié de l'intensité du laser permet de chauffer (et détruire) seulement les cellules tumorales, sans endommager les cellules saines environnantes.

Comment s'opère ce chauffage ? Le laser est choisi pour que l'onde lumineuse absorbée par les nanoparticules d'or ait la fréquence de plasmon. Forcés à osciller par le champ électrique de l'onde lumineuse, les électrons de surface de la particule d'or dissipent, *via* leurs collisions avec les atomes, l'énergie qu'ils reçoivent (effet Joule). La température des nanoparticules augmente et, par conduction, les cellules voisines s'échauffent aussi, ce qui conduit à leur destruction.

Pour que ce principe thérapeutique fonctionne, il est nécessaire que la longueur d'onde d'irradiation se situe à la fois dans la fenêtre spectrale de transparence des tissus biologiques (650 à 900 nanomètres) et dans le domaine des longueurs d'onde de résonance plasmon des nanoparticules utilisées. Avec des nanoparticules d'or de taille et de forme adéquates, on peut obtenir une longueur d'onde de résonance plasmon supérieure à 650 nanomètres, c'est-à-dire dans la fenêtre de transparence. Cette technique de photothermie a été testée sur des souris, où elle s'est révélée efficace *(voir la figure 3)*.

Promesses anticancéreuses

L'association possible de nanoparticules d'or aux traitements anticancéreux fait l'objet aujourd'hui de nombreux travaux, avec des résultats toujours plus prometteurs. Des recherches récentes ont notamment porté sur la forme et la taille optimales des nanoparticules, ou sur la possibilité d'améliorer leurs effets thérapeutiques et le ciblage des tumeurs en leur associant des co-agents, par exemple un second métal afin d'obtenir des particules bimétalliques ou en adsorbant des molécules actives à la surface des particules.

Les nanoparticules d'or ou d'un autre élément n'ont pas encore fait leur entrée dans les traitements anticancéreux dispensés à l'hôpital, mais ce moment est proche. Ainsi, l'entreprise française *Nanobiotix* teste chez l'homme une technique à base de nanoparticules d'oxyde d'hafnium,

LES AUTEURS

Delphine SCHAMING est chimiste et travaille au Laboratoire ITODYS de l'Université Paris-Diderot.

Olivier PLUCHERY est physicien à l'Institut des nanosciences de Paris.

Lynd REMITA, physico-chimiste au CNRS, travaille au Laboratoire de chimie physique de l'Université Paris-Sud, à Orsay.

A ECOUTER

Le jeudi 16 octobre 2014, de 14h à 15h, Olivier Pluchery parlera de la recherche sur les nanoparticules d'or dans la partie *Actualités* de l'émission **La marche des sciences** sur *France Culture*. www.franceculture.com

une substance très peu réactive. Métal de transition sans toxicité connue, l'hafnium, comme l'or, peut servir à déclencher des cascades d'électrons Auger à proximité des cellules cancéreuses. Lorsque la tumeur est retirée par chirurgie, l'emplacement est rempli d'un gel contenant les nanoparticules d'oxyde d'hafnium. Ce gel devrait aider à éliminer les dernières cellules cancéreuses, après l'excision chirurgicale de la tumeur.

Comment guider les nanoparticules

Toutes les méthodes que nous avons évoquées exigent de cibler les cellules cancéreuses, c'est-à-dire de parvenir à placer à leur proximité immédiate des nanoparticules d'or. Pour résoudre ce problème crucial, on habille les nanoparticules de molécules fonctionnelles, par exemple à l'aide de ligands (molécules se liant de façon réversible) soufrés, ayant une bonne affinité pour l'or.

En guise de molécules fonctionnelles, on peut utiliser des récepteurs de l'une des protéines que surexpriment, par rapport aux cellules saines, les cellules tumorales. La molécule fonctionnelle, attachée à la nanoparticule *via* le ligand, fixera alors la nanoparticule à la surface de la cellule. Nommée vectorisation, cette procédure permet de diriger les nanoparticules spécifiquement vers les cellules malades. Après injection, les nanoparticules s'accumulent à la surface des cellules tumorales, ce qui permet d'y amplifier l'effet de la radiothérapie.

La vectorisation de nanoparticules d'or a également fait l'objet d'essais en chimiothérapie. Faciles à fonctionnaliser, les nanoparticules d'or peuvent en effet être utilisées pour véhiculer des molécules anticancéreuses jusqu'aux tumeurs. En 2009, la société américaine *CytImmune* a ainsi mené un premier essai clinique de l'utilisation de nanoparticules d'or chez des patients souffrant de cancers avancés. Et en 2013, le groupe pharmaceutique britannique *AstraZeneca* s'est allié avec *CytImmune* pour mettre au point une chimiothérapie anticancéreuse utilisant des nanoparticules d'or.

BIBLIOGRAPHIE

D. Schaming et H. Remita, **Nanotechnology : From the ancient time to nowadays**, *Foundations of Chemistry*, à paraître, 2014.

D. Pluchery et M. Carrière, **Nanoparticules d'or**, *Techniques de l'Ingénieur*, NM 900, 2011.

D. Thompson, **Michael Faraday's recognition of ruby gold: the birth of modern nanotechnology**, *Gold Bulletin*, vol. 40, pp. 267-269, 2007.

E. Boisselier et D. Astruc, **Gold nanoparticles in nanomedicine : Preparations, imaging, diagnostics, therapies and toxicity**, *Chemical Society Reviews*, vol. 38, pp. 1759-1782, 2009.

En 2012, une méthode de curiethérapie à base de nanoparticules d'or a aussi été testée. Imaginée en 1901 par Pierre Curie, la curiethérapie consiste à placer directement une source radioactive à proximité de la tumeur, afin de réaliser une sorte de radiothérapie interne. L'emploi à cet effet de nanoparticules d'or radioactif a été testé par Kattesh Katti, de la Faculté de médecine de l'Université Missouri-Columbia aux États-Unis, et par Marc-André Fortin, du Centre hospitalier universitaire de Québec, pour soigner des cancers de la prostate. L'isotope radioactif de l'or utilisé, ^{198}Au, a une période de demi-vie (durée de réduction par moitié du nombre d'atomes radioactifs) de 2,7 jours, de sorte qu'au bout de quelques semaines, toute la radioactivité a disparu du corps. Déjà testée sur des souris, la méthode va bientôt l'être sur des chiens, le cancer de la prostate des canins étant similaire à celui des humains.

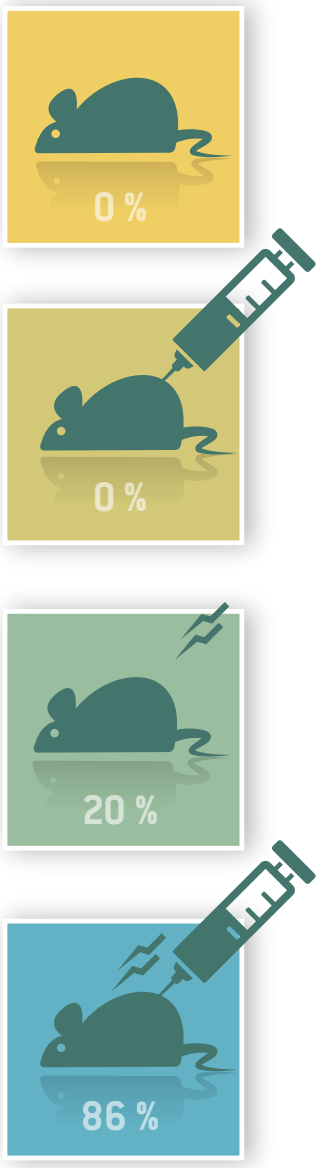
La vectorisation de nanoparticules fonctionnalisées est en outre envisagée dans le domaine du diagnostic médical, par exemple afin de détecter des cellules cancéreuses ou des agents infectieux. Ainsi, on pourrait faire appel à des nanoparticules d'or adéquatement fonctionnalisées pour détecter des bactéries, telles *Mycobacterium tuberculosis* responsable de la tuberculose, ou des virus, tels ceux du sida ou de l'hépatite B.

Un autre domaine d'application des nanoparticules d'or est celui des biocapteurs, pour détecter certaines molécules biologiques par exemple. Dans ce type d'applications, ce sont les propriétés plasmoniques que l'on exploite en général : l'onde plasmonique qui naît à la surface des nanoparticules d'or quand elles sont correctement éclairées dépend en effet de l'environnement. En particulier, l'adsorption de molécules organiques à leur surface modifie la fréquence de résonance plasmon. Le décalage de fréquence correspondant dépend de la nature et de la quantité des molécules adsorbées.

Cette propriété des ondes plasmoniques a été mise à profit de diverses façons. Ainsi, certains tests de grossesse actuellement en vente sont à base de nanoparticules d'or fonctionnalisées avec des anticorps de l'hormone β-hCG, caractéristique de la grossesse. Si cette hormone est présente dans l'urine testée, elle va se fixer aux anticorps greffés aux nanoparticules. Ces dernières s'agrègent et sont retenues par un filtre qui se colore en rouge.

L'application des nanoparticules d'or en imagerie médicale est aussi à l'étude, car ces nano-objets font un bon agent de contraste en microscopie, en imagerie par rayons X ou encore en imagerie par résonance magnétique (IRM).

Signalons pour terminer que l'or n'est pas le seul élément métallique intéressant sous la forme de nanoparticules. Les particules d'argent font aussi l'objet de nombreuses recherches, notamment pour leurs propriétés antibactériennes.



3. DES SOURIS atteintes de cancer mammaire ont été traitées par radiothérapie, avec ou sans injection intraveineuse de nanoparticules d'or au préalable. Le taux de survie un an après le traitement des souris ayant bénéficié du double traitement était bien supérieur à celui des autres souris.

Un essor attendu

Il en est des nanoparticules d'or comme de tant de techniques prometteuses en laboratoire : une fois leur intérêt démontré, il reste à les introduire dans la pratique, qu'elle soit industrielle, médicale, légale, etc. Cela dépend de nombreux facteurs tels que les coûts, les avantages et inconvénients des techniques alternatives, les habitudes professionnelles, etc. C'est pourquoi les applications concrètes, parvenues au stade industriel, des nanoparticules d'or sont encore peu nombreuses.

S'agissant des applications biologiques, l'un des freins est que la toxicité des nanoparticules, tant pour l'environnement que pour l'homme, reste mal connue. On sait que l'or est un élément biocompatible, mais des études sont en cours pour évaluer les risques potentiels de ce métal sous forme de particules nanométriques et les moyens d'y parer.

Les résultats montrent que la toxicité dépend non seulement de la nature chimique des nanoparticules considérées, mais aussi de leur taille, de leur forme et de leur enrobage (les molécules présentes à leur surface), de sorte qu'elles varient d'une application à l'autre. De nouvelles analyses plus approfondies sont en cours, tandis que des progrès sont réalisés dans le contrôle de la forme et la taille des nanoparticules, et par conséquent de leurs propriétés.

Par ailleurs, l'or étant le troisième meilleur des conducteurs métalliques, l'utilisation de ses nanoparticules en microélectronique excite aussi les imaginations, tandis que ses propriétés optiques n'ont sûrement pas été exploitées sous toutes leurs facettes. La ruée vers le nano-or bat son plein dans les laboratoires, mais ne fait que commencer dans l'industrie. ■

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE
DE L'ÉDUCATION NATIONALE,
DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE

CIEL & ESPACE
POUR LA SCIENCE
familiscope
OKAPI
PHOSPHORE

FÊTE DE LA SCIENCE

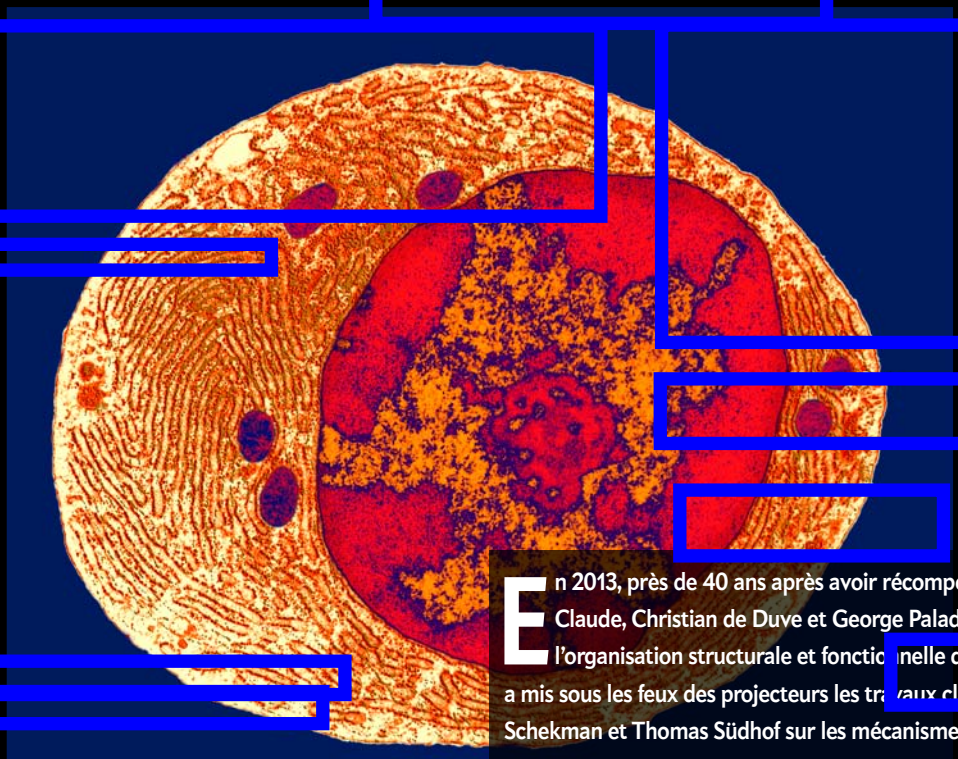
Retrouvez plus de 3000 animations partout en France

www.fetedelascience.fr
www.facebook.com/fetedelascience

du vendredi 26 septembre au dimanche 19 octobre 2014

Accès site mobile

NOBEL 2013
Du trafic dans les cellules



En 2013, près de 40 ans après avoir récompensé les biologistes Albert Claude, Christian de Duve et George Palade pour la découverte de l'organisation structurale et fonctionnelle de la cellule, le comité Nobel a mis sous les feux des projecteurs les travaux clés de James Rothman, Randy Schekman et Thomas Südhof sur les mécanismes du trafic vésiculaire.

Ce processus est essentiel à la vie des cellules et à leur communication au sein de l'organisme. Des maladies neurologiques, immunologiques et endocrines peuvent résulter des défauts de trafic vésiculaire. La récompense de 2013 clôt plusieurs séries de travaux remarquables alliant la physico-chimie des membranes, la biologie cellulaire, la génétique et les neurosciences. Une nouvelle ère s'est ouverte, où l'on s'attache désormais à comprendre et modéliser comment ce trafic est relié aux autres processus importants dans la vie d'une cellule et à décrire ses multiples rôles dans le développement, le vieillissement et les pathologies.

Les Nobels 2013 de physiologie et médecine seront réunis le 19 novembre 2014 pour une conférence exceptionnelle à Paris avec des biologistes français qui ont apporté des contributions majeures à la compréhension du trafic vésiculaire. C'est l'occasion de revenir avec eux sur l'histoire de leurs découvertes *(voir l'entretien page 42)* et de demander à deux des acteurs français du domaine, Geneviève de Saint-Basile et Bruno Goud, leur vision des recherches futures *(voir* Et maintenant ?, *page 46)*.

L'un des enseignements des travaux présentés ici est la puissance des approches multidisciplinaires en biologie. C'est sans doute aussi la clé des découvertes à venir.

-Thierry Galli
Inserm U950, Institut Jacques Monod, Paris

© Dr. Donald Fawcett/Visuals Unlimited/Corbis

© Pour la Science

RÉCIT d'une découverte

Entretien avec J. ROTHMAN
R. SCHEKMAN
Th. SÜDHOF

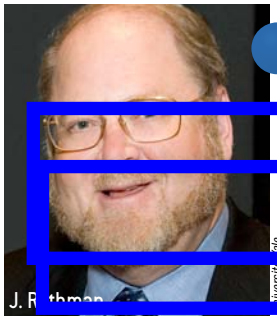
Les cellules sont le siège d'un intense trafic : sans cesse, des protéines transitent d'un endroit à un autre, transportées par des vésicules. Retour sur la découverte des mécanismes qui régulent ce trafic.

En 2013, James Rothman, de l'Université Yale, Randy Schekman, de l'Université de Californie à Berkeley, et Thomas Südhof, de l'Université Stanford, aux États-Unis, ont reçu le prix Nobel de physiologie et médecine pour « leurs découvertes de la machinerie qui régule le trafic vésiculaire, un système de transport majeur dans nos cellules ». De quoi s'agit-il ? Quel cheminement les a conduits à ces mécanismes indispensables au fonctionnement de l'organisme ? Voici leur témoignage.

POUR LA SCIENCE

Qu'est-ce que le trafic vésiculaire et qu'en savait-on lorsque vous avez commencé à vous y intéresser ?

JAMES ROTHMAN : Le trafic vésiculaire est le mode de transport des protéines dans la cellule. Dans les années 1970, lorsque j'ai commencé à m'y intéresser, il n'existait que des images statiques de l'intérieur des cellules, obtenues par microscopie électronique. Mais l'idée d'un transport intracellulaire était déjà née depuis les années 1950 dans la tête d'une personne, George Palade (1912-2008), alors à l'Université Rockefeller, à New York. À cette époque, il était bien compris que la cellule est divisée en une série de compartiments connectés, chacun ayant sa propre fonction. Palade avait étudié ces compartiments de près, notamment en les récupérant après avoir fractionné les cellules. Il avait ainsi montré qu'un de ces compartiments, le réticulum endoplasmique, est recouvert de particules qui fabriquent les protéines – les ribosomes.


J. R[illegible]

R. S[illegible]

Th. Südhof

Steve Fisher, Université Stanford

PLS

Comment l'idée d'un transport de ces protéines s'est-elle imposée ?

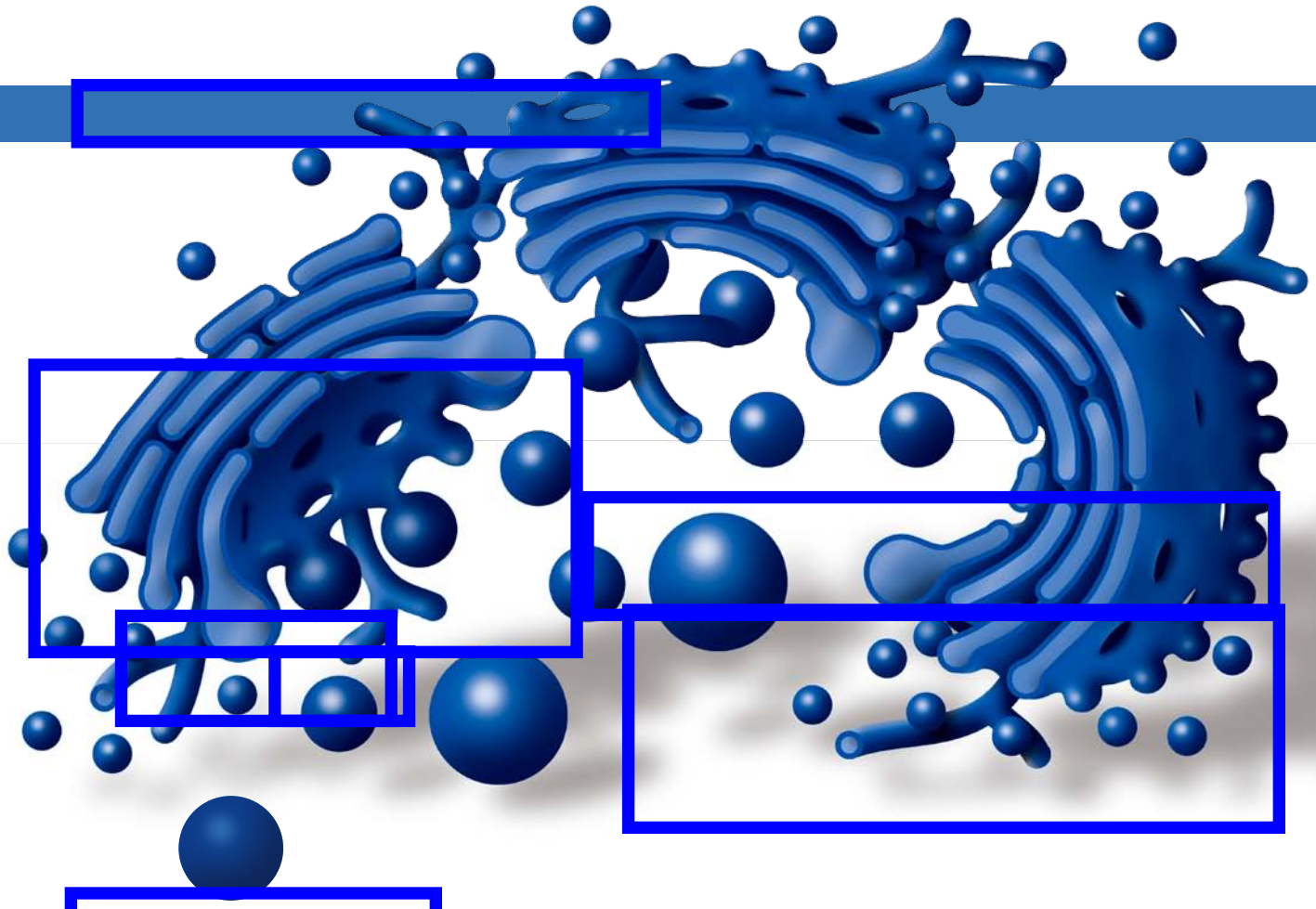
J. R. : Dans une cellule, les ribosomes fabriquent jusqu'à 10 000 types différents de protéines, qui vont ensuite à l'endroit de la cellule où elles jouent leur rôle. Comment sont-elles acheminées ? C'est ce que Palade et ses collègues ont découvert, d'une part en étudiant la composition chimique des compartiments extraits des cellules et, d'autre part, en montrant que de « nouveaux » compartiments sont produits à partir d'« anciens » : les protéines sont déplacées du réticulum endoplasmique jusqu'à un compartiment intermédiaire nommé l'appareil de Golgi, puis vers diverses destinations dans la cellule. Palade a reçu le prix Nobel en 1974 pour cette découverte, et beaucoup de nos travaux commencent avec lui.

PLS

Pourquoi qualifie-t-on ce trafic de vésiculaire ?

J. R. : Nous y arrivons. La question clé soulevée par Palade et ses collègues était : comment les bonnes protéines sont-elles libérées au bon

© Science Photo Library/Corbis



endroit et au bon moment ? Ils ont alors eu une idée, qui s'est révélée correcte : ils avaient découvert de petits objets sphériques, de 50 nanomètres de diamètre environ, qu'ils avaient nommés vésicules. Ils ont émis l'hypothèse que ces vésicules véhiculent les protéines. Palade a imaginé que ces vésicules se formaient en bourgeonnant à la membrane d'un compartiment, puis voyageaient jusqu'à une autre membrane à laquelle elles se joignaient alors, combinant leur membrane à celle-ci – un processus qu'il a nommé fusion membranaire.

PLS

C'est alors que vous, Randy Schekman et James Rothman, êtes entrés en scène, par deux approches distinctes.

RANDY SCHEKMAN : En effet, Palade avait dessiné la carte de la voie de sécrétion des protéines, mais il fallait encore comprendre ce qui, mécaniquement, permettait ce processus. J'ai donc décidé d'utiliser la génétique pour disséquer cette voie et aller à la pêche aux gènes impliqués. J'avais travaillé dans le laboratoire d'Arthur Kornberg (prix Nobel en 1959), qui avait mis en évidence le mécanisme de réplication de l'ADN, et j'y avais acquis la conviction qu'une approche génétique pouvait aider à comprendre des processus complexes. En 1976, à Berkeley, j'ai commencé à travailler sur la voie de sécrétion des protéines de la levure du boulanger. Au microscope, on distinguait des vésicules dans le bourgeon de la levure – l'excroissance qui devient une cellule fille après la division cellulaire. Ces vésicules sécrétaient peut-être des protéines ? Nous avons montré que non seulement c'était bien le cas, mais qu'elles fournissaient de la membrane au bourgeon cellulaire. Le système paraissait donc propice à l'étude du trafic vésiculaire.

PLS

Comment va-t-on « à la pêche » aux gènes impliqués dans le transport vésiculaire ?

R. S. : En recherchant des mutations qui perturbent la croissance de la surface cellulaire. Nous nous sommes dit que toute mutation qui interromprait cette croissance détruirait la cellule. Alors, avec Peter Novick, un de mes premiers étudiants, nous avons décidé de rechercher des mutations létales pour la cellule et sensibles à la température. Après quelques essais, Peter a compris qu'il serait possible d'obtenir des mutations qui bloqueraient la sécrétion simplement en analysant un assemblage de clones présentant des mutations aléatoires : il suffisait d'exposer des cultures de levure à un agent chimique favorisant les mutations génétiques, de cultiver chaque cellule et d'analyser les clones obtenus.

Un jour, Peter m'appelle au microscope électronique. Nous n'avions jamais vu une telle cellule : à une température restrictive où elle aurait dû mourir, elle était comme constipée de vésicules ! Remis à une température permissive, ce mutant a libéré le contenu des vésicules à la surface cellulaire. Nous avions trouvé une mutation qui perturbait la sécrétion en fonction de la température. Nous avons nommé *sec1* le gène muté.

PLS

Il « suffisait » donc de rechercher les mutations qui « constipaient » les cellules ?

R. S. : C'est ce que nous pensions, mais nous n'avons trouvé que peu de mutants impliqués, jusqu'à ce que Peter remarque qu'à la température restrictive, ces cellules ne grossissaient plus, mais produisaient toujours des vésicules. Nous avons supposé que la densité des cellules augmentait à cette température et qu'il serait donc possible de les récupérer en les centrifugeant dans un gradient de densité. C'est ce que nous avons fait. En n'analysant plus que ces cellules denses, Peter a identifié, dans l'année qui a suivi, une centaine de mutations qui perturbaient la sécrétion en fonction de la température. Ces mutations touchaient 23 gènes, que nous avons nommés *sec1* à *sec23*. Aujourd'hui, on sait que la voie de sécrétion fait très probablement intervenir une centaine de gènes, impliqués à toutes les étapes.

PLS

James Rothman, en quoi consistait votre approche et comment l'avez-vous choisie ?

J. R. : Le transport de protéines intervient dans nombre de processus cellulaires : croissance, division cellulaire, régulation de l'insuline, métabolisme, immunité, communication entre neurones… Face à cette complexité, il est naturel d'imaginer qu'il y a autant de mécanismes que de fonctions. Mais l'idée la plus simple est de dire qu'il n'y a qu'un seul mécanisme pour tous ces processus. Cela peut paraître simpliste, surtout pour un biologiste, mais je venais de la physique ! J'ai grandi à une époque où l'on entendait beaucoup parler de physique avec la compétition des États-Unis et de l'Union soviétique engendrée par la guerre froide. Je me suis mis à penser le monde en physicien et à étudier la physique. Et lorsque je me suis intéressé à la biologie, je l'ai regardée à la façon d'un physicien.

La physique de la fusion membranaire n'est pas un problème. Une membrane biologique est constituée de deux couches de lipides, et fusionner deux membranes n'est pas plus compliqué que réunir deux bulles de savon. La question était : comment la biologie exploite-t-elle la physique pour libérer le bon chargement à la bonne place au bon moment ? S'il existait un mécanisme commun à tous les transports vésiculaires, il serait peut-être plus facile de le mettre en évidence dans un système biologique simplifié. Avec Erik Fries, un postdoctorant suédois, nous avons donc décidé de travailler hors cellule, avec des extraits de cellules de mammifères.

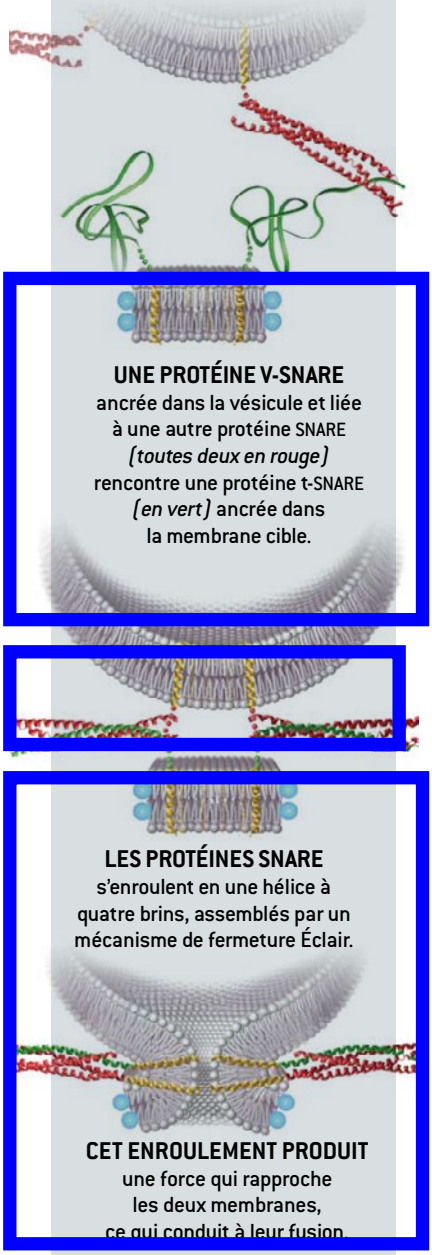
PLS

Comment s'y retrouver dans un tel mélange ?

J. R. : L'idée clé a été de suivre une protéine que sécrètent les cellules infectées par le virus de la stomatite vésiculaire : la glycoprotéine VSV-G. Sur son chemin vers la surface cellulaire, cette protéine est glycosylée : des molécules de sucre se forment sur elle par l'ajout progressif de résidus de sucre le long de la voie de sécrétion. Nous avons donc mesuré l'élaboration de ces sucres dans notre système en examinant si de nouveaux résidus se liaient à la protéine. L'ajout de chaque résidu étant spécifique d'un compartiment de la voie de sécrétion, en trouver de nouveaux sur la protéine signifiait que la protéine s'était déplacée d'un compartiment à un autre. Après quelque temps, enfin, en mai 1979, nous avons observé que la glycoprotéine était bien modifiée.

La fusion membranaire

Aujourd'hui, on connaît la structure tridimensionnelle des protéines qui régissent la fusion d'une vésicule avec une membrane cible, et le mécanisme qui déclenche cette fusion.



UNE PROTÉINE V-SNARE
ancrée dans la vésicule et liée à une autre protéine SNARE *(toutes deux en rouge)* rencontre une protéine t-SNARE *(en vert)* ancrée dans la membrane cible.

LES PROTÉINES SNARE
s'enroulent en une hélice à quatre brins, assemblés par un mécanisme de fermeture Éclair.

CET ENROULEMENT PRODUIT
une force qui rapproche les deux membranes, ce qui conduit à leur fusion.

PLS

Comment avez-vous exploité ce système ?

J. R. : Nous l'avons d'abord perfectionné, ce qui nous a permis de montrer que certains éléments de la cellule étaient indispensables au transport vésiculaire, notamment le liquide intracellulaire ou cytosol. Nous avons alors testé l'effet d'inhibiteurs d'enzymes du cytosol. L'un d'eux, le NEM, a entraîné une accumulation de vésicules. Il existait donc un facteur sensible au NEM qui permettait la fusion en l'absence de NEM. Nous avons réussi à purifier ce facteur et l'avons nommé NSF *(NEM Sensitive Factor)*. Lorsqu'on l'ajoutait à notre système *in vitro*, NSF reconstituait le transport et la fusion membranaire. La protéine jouait donc un rôle dans la fusion membranaire, et nous pourrions l'utiliser comme appât pour, nous aussi, aller à la pêche – à ses partenaires. Nous avons ainsi isolé une protéine du cytosol qui joue le rôle d'intermédiaire entre NSF et la membrane, que nous avons nommée SNAP *(Soluble NSF Attachment Protein)*.

PLS

D'un côté, les 23 gènes *sec* identifiés chez la levure, de l'autre, les protéines NSF et SNAP isolées dans des cellules de mammifères. Comment avez-vous réuni les deux histoires ?

R. S. : Au début des années 1990, les gènes de levure impliqués dans la voie de sécrétion étaient connus. De leur côté, J. Rothman et ses collègues avaient séquencé les gènes codant les protéines NSF et SNAP chez les mammifères. En comparant les séquences, ils ont découvert que le gène codant NSF était très semblable à *sec18*, et celui codant SNAP, très similaire à *sec17*. À ce point, nos deux chemins ont convergé. Cette convergence était fondamentale, car elle signifiait que les acteurs du trafic intracellulaire sont conservés de la levure aux mammifères.

PLS

Les acteurs identifiés expliquaient-ils la spécificité des voies de sécrétion ?

J. R. : Ils ont permis de préciser les choses. Il est apparu que NSF et SNAP intervenaient dans tous

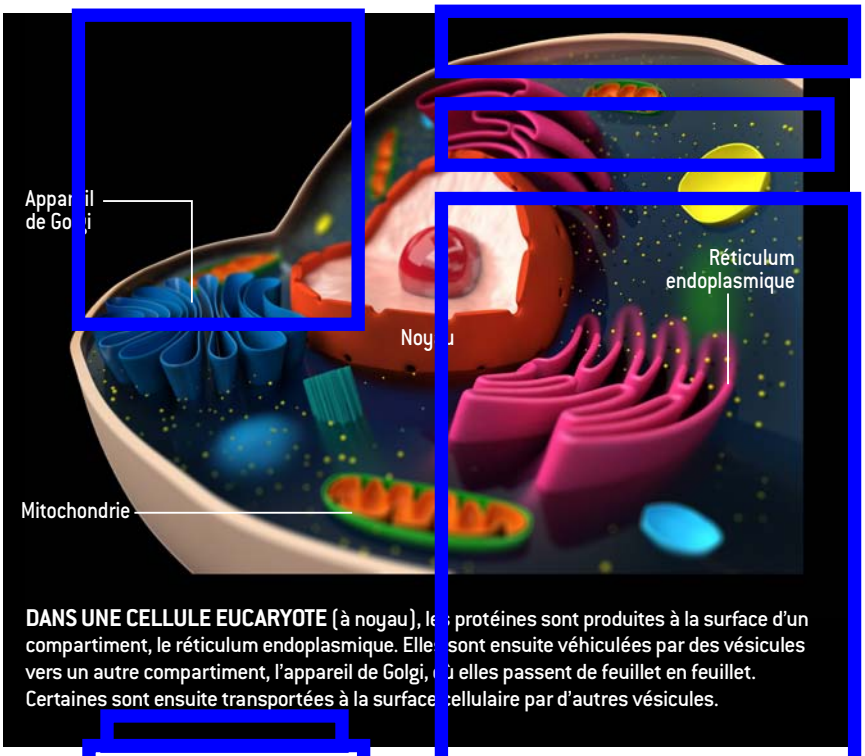
Avec l'autorisation de Macmillan Publishers Ltd: Nature Protocols, Shi et al., vol. 8, pp. 935-948 © 2013

es processus de fusion membranaire connu à cette époque. Les deux protéines ne portaient donc pas la spécificité, et des récepteurs de SNAP sur la membrane des vésicules devaient remplir ce rôle.

Nous sommes à nouveau partis à la pêche pour isoler ces protéines, que nous avions nommées SNARE, à partir d'un extrait de cerveau bovin.

Nous avons utilisé des extraits de cerveau car la concentration de SNARE y était dix fois plus importante que dans tout autre tissu de l'organisme. Nous avons ainsi récolté trois protéines… déjà bien connues des neuroscientifiques : la syntaxine, SNAP-25 et VAMP faisaient partie des acteurs de la transmission synaptique – la communication entre les neurones. Nous avons montré que ces trois protéines forment un complexe où l'une est localisée dans les vésicules synaptiques, tandis qu'une autre réside dans la membrane du neurone.

Nous avons alors imaginé le scénario suivant : une vésicule s'accroche et fusionne avec une membrane cible lorsqu'une protéine v-SNARE de la vésicule interagit avec une protéine t-SNARE de la membrane cible. Chaque vésicule et chaque membrane partenaire auraient leurs propres et uniques protéines v-SNARE et t-SNARE, qui constitueraient les partenaires spécifiques et démarreraient la fusion membranaire. Ce mécanisme serait une source majeure de spécificité de la fusion membranaire. Cette hypothèse a été validée quelques années plus tard, quand nous avons montré *in vitro*, avec des membranes artificielles, que ces trois protéines sont nécessaires et suffisantes pour la fusion membranaire.



© aranicle/shutterstock.com

DANS UNE CELLULE EUCARYOTE (à noyau), les protéines sont produites à la surface d'un compartiment, le réticulum endoplasmique. Elles sont ensuite véhiculées par des vésicules vers un autre compartiment, l'appareil de Golgi, où elles passent de feuillet en feuillet. Certaines sont ensuite transportées à la surface cellulaire par d'autres vésicules.

PLS

Thomas Südhof, vos travaux sur le transport vésiculaire dans les neurones débutent à ce moment. Pourquoi ce sujet ?

THOMAS SÜDHOF : Le cerveau ressemble à un puissant ordinateur, constitué de circuits neuronaux dont les unités de base sont les synapses, les jonctions permettant la transmission de l'information d'un neurone à un autre. Les synapses fonctionnent toutes sur le même principe : un potentiel électrique déclenche l'ouverture de canaux de calcium dans la zone synaptique du premier neurone ; du calcium pénètre dans la cellule et déclenche à son tour la libération, dans la synapse, de neurotransmetteurs, des molécules qui se lient à des récepteurs à la surface du second neurone, déclenchant ainsi un potentiel d'action. Ce qui est remarquable dans la transmission synaptique, c'est sa rapidité : il suffit de quelques millisecondes. La clé de cette rapidité devait se trouver dans l'étape la plus complexe du processus : la transformation du signal calcique en une fusion des vésicules synaptiques, contenant les neurotransmetteurs, avec la surface cellulaire. D'où mon intérêt pour cette étape. J'ai recherché les mécanismes qui assuraient cette fusion rapide.

PLS

Quelle approche avez-vous choisie ?

T. S. : D'une part, nous avons étudié la fusion des vésicules synaptiques elles-mêmes, ce qui nous a permis d'isoler un régulateur essentiel de l'activité de la synaptotagmine, une des protéines du complexe SNARE de ces vésicules. D'autre part, nous avons caractérisé de façon systématique les protéines des vésicules synaptiques et étudié leur fonction chez la souris, dans des neurones mutants où les gènes associés ne sont plus fonctionnels. Cette approche a conduit notamment à la découverte de deux protéines impliquées dans la régulation temporelle de la fusion membranaire, la synaptotagmine et la complexine, qui sont en quelque sorte l'accélérateur et le frein de la fusion. La synaptotagmine, située sur les vésicules, capte le calcium, ce qui déclenche la libération de neurotransmetteurs. Liée au complexe SNARE, la complexine est une sorte de pince qui empêche la vésicule de fusionner tant que du calcium n'est pas lié à la synaptotagmine.

PLS

Aujourd'hui, comment décririez-vous la fusion des vésicules synaptiques et que reste-t-il à comprendre ?

T. S. : Ces dernières années, nous avons complété ce schéma en élucidant le mécanisme qui permet au neurone présynaptique de ne faire entrer du calcium que là où des vésicules synaptiques sont amarrées : un complexe de protéines orchestre l'amarrage des vésicules près de canaux calciques. L'ensemble des protéines intervenant dans la fusion membranaire ressemble ainsi de plus en plus à une nanomachine dont le rôle serait de déclencher une libération rapide des neurotransmetteurs. Il s'agit maintenant de comprendre comment cette nanomachine fonctionne durant la « vie » d'une synapse…

Et maintenant ?

En mettant au jour la machinerie moléculaire orchestrant la fusion membranaire dans les cellules, James Rothman, Randy Schekman et Thomas Südhof ont découvert des acteurs et des mécanismes à l'œuvre dans des organismes aussi distants que l'homme et la levure, et dans des fonctions aussi variées que le transport des molécules dans la cellule, la communication neuronale, la sécrétion hormonale ou la réponse immunitaire.

Aujourd'hui, des centaines de biologistes explorent les voies de recherche ainsi tracées, qu'il s'agisse d'expliciter les spécificités de chaque type de transport vésiculaire, d'étudier la contribution des phénomènes sécrétoires au développement du cerveau, de comprendre comment le trafic intracellulaire s'insère dans la vie de la cellule ou de préciser comment son dysfonctionnement intervient dans des pathologies telles que la maladie de Parkinson, l'épilepsie et certaines déficiences immunitaires. Deux volets de cette recherche multiforme sont ici mis en avant : le rôle du trafic vésiculaire dans la réponse immunitaire, et sa place dans le fonctionnement de la cellule.

Les défis de la recherche sur

Poursuivant les travaux pionniers de George Palade (prix Nobel de médecine en 1974), James Rothman, Randy Schekman, Thomas Südhof et leurs collègues ont élucidé certains des mécanismes moléculaires fondamentaux qui gouvernent le transport des protéines et des lipides à l'intérieur des cellules eucaryotes.

Beaucoup reste cependant à découvrir et ce champ de la biologie cellulaire mobilise un nombre croissant d'équipes de recherche à travers le monde, car le trafic vésiculaire est un processus essentiel de la cellule. Les recherches actuelles s'orientent dans de nombreuses directions, faisant appel à d'autres champs disciplinaires et à de nouvelles approches méthodologiques. Voici quelques-uns des principaux défis que les chercheurs auront à relever dans les prochaines années.

– **Bruno Goud**
CNRS UMR 144, Institut Curie, Paris

■ Comprendre dans l'espace et le temps la dynamique complexe des événements de transport. La révolution introduite au début des années 1990 par l'utilisation de protéines fluorescentes, qui permettent de visualiser le transport des protéines et des lipides en temps réel dans des cellules vivantes, a révélé la dynamique et la plasticité des compartiments de la cellule. Grâce au développement des techniques d'imagerie, les chercheurs arriveront bientôt à suivre le trajet d'une seule vésicule et de son contenu et à comprendre la dynamique de sa formation, de son déplacement le long du squelette cellulaire et de sa fusion avec les membranes cibles. Un défi que J. Rothman a relevé lors de sa conférence Nobel...

■ Expliquer aux niveaux moléculaires et structuraux l'ordre des événements présidant à la vie d'une vésicule. Les grandes familles de protéines impliquées sont identifiées, telles que les protéines formant un manteau autour des vésicules, les protéines de fusion SNARE, les moteurs moléculaires de type myosine ou kinésine qui se déplacent sur le squelette de la cellule, et les enzymes de la famille Rab. La façon dont leur fonction est coordonnée pour assurer la spécificité des processus de transport et le bon acheminement des cargaisons demeure encore mal comprise. De nombreuses études mettent actuellement en évidence des liens physiques entre des protéines au sein d'édifices supramoléculaires.

© Pour la Science - n° 444 - Septembre 2014

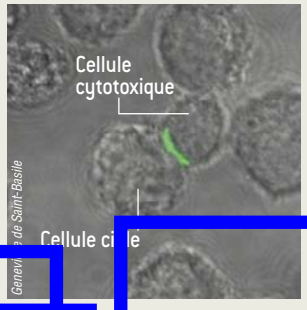
Du trafic à la réponse immunitaire

Pour exercer leur fonction, certaines cellules de l'organisme doivent sécréter à un moment et un endroit précis des constituants contenus dans des vésicules. C'est le cas des neurones du cerveau qui, en réponse à un stimulus, communiquent en sécrétant des neurotransmetteurs dans leur zone de contact – la synapse neurologique.

C'est aussi le cas des cellules tueuses de notre système immunitaire, les lymphocytes cytotoxiques, dont le rôle est d'éliminer les cellules infectées par un virus ou tumorales. Le lymphocyte tueur détecte la cellule indésirable et s'organise, dans leur zone de contact, une synapse immunologique. Des granules contenant des protéines cytotoxiques (*en vert*) sont transportés vers elle et déversent leur charge dans la synapse, ce qui permet l'attaque sur la cellule à éliminer.

L'utilisation de cette arme nécessite une cascade d'événements dont chaque étape est régulée par un effecteur (une protéine) précis. L'absence de l'un ou l'autre des effecteurs bloque la machinerie de sécrétion et conduit à une déréglementation du système immunitaire nommée syndrome hémophagocytaire. Au cours de ce syndrome, la réponse immunitaire, incapable d'éliminer [illegible], est [illegible] l'absence de traitement.

C'est l'étude des formes héréditaires de ce syndrome qui a permis, ces dernières années, d'identifier les effecteurs indispensables [illegible] sécrétion des granules. Par une approche génétique chez des patients, quatre acteurs critiques ont été identifiés, intervenant dans le transport, l'amarrage des granules [illegible] leur préparation à la fusion et la fusion elle-même. Chacun avait son pendant dans la machinerie qui régule la sécrétion des neurotransmetteurs à la synapse neurologique, ce qui a facilité la compréhension des mécanismes en jeu dans la synapse immunologique.



Certaines différences existent cependant, tel le fait que la synapse immunologique soit transitoire et puisse se former à un endroit quelconque de la membrane du lymphocyte, alors que la synapse neurologique est fixe. Il en résulte que la sécrétion y est plus lente. Il reste à déterminer si d'autres processus liés à la synapse neurologique existent pour la synapse immunologique, tel le recyclage des vésicules ou l'adaptation de la sécrétion à l'importance de la stimulation.

– Geneviève de Saint-Basile
Inserm 1163, Institut Imagine, Paris V, Hôpital Necker-Enfants malades

le trafic vésiculaire

■ Identifier les paramètres physico-chimiques sous-tendant les processus de transport. Tous les organismes vivants dépendent de lois physico-chimiques qui gouvernent les échanges moléculaires et les mécanismes de base [illegible] tissus. Des études récentes ont par exemple mis en évidence le rôle essentiel [illegible] il y a encore dix ans de la composition lipidique, de la courbure et de la tension des membranes dans la formation des vésicules de transport. Le rôle de ces paramètres au cours d'autres étapes du transport, telles la fission ou la fusion des vésicules, reste très mal connu. Ces études seront indispensables pour parvenir à une description quantitative et intégrée du transport.

■ Comprendre les liens entre le transport et d'autres processus cellulaires essentiels tels que l'activation des voies de signalisation, la migration ou la division. Le transport intracellulaire et la dynamique membranaire sont couplés à [illegible] de la cellule. En témoignent les études montrant l'importance de la dynamique des endomembranes (telles que l'appareil de Golgi ou les endosomes, les vésicules transportant dans la cellule les composants externes qu'elle a « avalés ») et de leur topologie dans la signalisation, ou celle de la sécrétion et du recyclage des composants de la surface pendant la migration. Beaucoup reste à faire pour intégrer tous ces processus.

■ Comprendre le rôle de la dérégulation du transport intracellulaire dans de nombreuses pathologies. Un nombre croissant d'études montre un rôle direct de la dérégulation du transport intracellulaire dans des pathologies telles que le cancer, la maladie d'Alzheimer ou encore le diabète. Un défi majeur pour le futur sera d'identifier, parmi les certaines de protéines régulant le transport intracellulaire, celles qui constituent des cibles thérapeutiques potentielles.

■ EN VIDÉO

Les conférences et interviews des trois prix Nobel 2013 de physiologie et médecine :

James Rothman
http://www.nobelprize.org/mediaplayer/index.php?id=1975

Randy Scheckman
http://www.nobelprize.org/mediaplayer/index.php?id=1977

Thomas Südhof
http://www.nobelprize.org/mediaplayer/index.php?id=1986

Du gaz galactique aux étoiles

Comment naissent les étoiles dans les nuages de gaz d'une galaxie spirale ? Des simulations numériques élucident le lien entre la dynamique de ces nuages et la formation des étoiles.

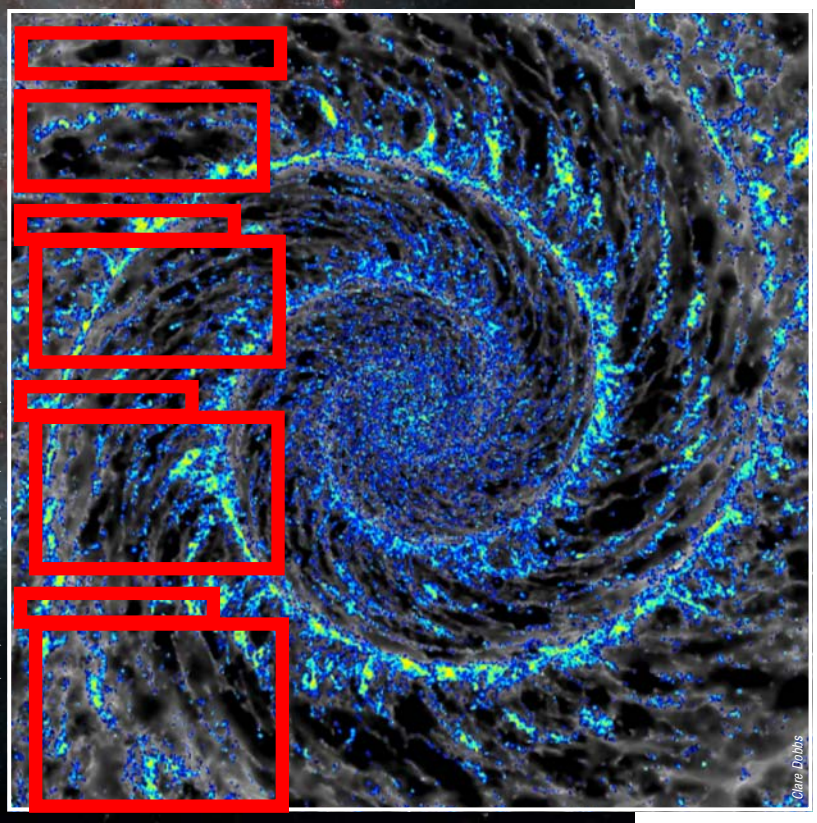
Clare Dobbs

L'ESSENTIEL

- Les étoiles se forment dans les nuages de gaz galactique denses.
- Les astrophysiciens utilisent des simulations numériques pour étudier le lien entre ces nuages et les étoiles.
- Les importantes différences d'échelles nécessitent d'étudier d'abord la formation des nuages avant de zoomer sur les étoiles.
- La dynamique des nuages est soumise à des forces antagonistes : la gravité condense le gaz et la rétroaction des étoiles, tel le vent stellaire, le disperse.

© Pour la Science - n° 444 - Octobre 2014

1. LA GALAXIE DU TOURBILLON *(à gauche)* est une galaxie spirale à deux bras. Les amas d'étoiles *(en rouge)* et les nuages de gaz *(les régions sombres)* coïncident. Pour étudier le lien entre eux, les astrophysiciens font appel à des simulations numériques *(ci-dessous)*. Ces simulations reproduisent assez bien les structures observées.



NASA, ESA, S. Beckwith (STScI), and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

Clare Dobbs

Les galaxies spirales sont parmi les objets les plus élégants de l'Univers. Leur aspect géométrique repose sur de longs bras de gaz et d'étoiles qui s'enroulent suivant un motif régulier. Mais cette structure n'est pas figée : les galaxies spirales sont en constante évolution. Tandis qu'elles tournent sur elles-mêmes comme des moulins à vent, leurs bras se lovent, s'étirent et se déchirent. Les étoiles qui les constituent ne sont pas plus immuables : elles naissent, vieillissent et meurent en se refroidissant ou en explosant en supernova.

L'évolution de la galaxie et celle des étoiles sont étroitement liées, mais il était jusqu'à présent difficile d'étudier simultanément la dynamique à grande échelle et celle des processus qui régulent la vie des étoiles. Cet obstacle est en voie d'être surmonté grâce à la puissance des nouveaux supercalculateurs, qui permet aux astronomes de réaliser des simulations numériques détaillées de la formation des étoiles au sein d'une galaxie. Il en résulte une compréhension sans précédent de la vie des galaxies spirales.

Le Système solaire est situé sur un bras de la Voie lactée, à 28 000 années-lumière du centre galactique. Ainsi, nous voyons notre galaxie par la tranche et il est difficile d'en déterminer la forme. La vision moderne de la Galaxie s'est forgée progressivement à partir de 1610, lorsque Galilée a pointé sa lunette astronomique vers la traînée blanchâtre qu'est la Voie lactée et a compris qu'elle est constituée d'étoiles. Ce n'est qu'au XVII^{e} siècle que l'astronome anglais Thomas Wright et le philosophe allemand Emmanuel Kant ont avancé l'idée que la Voie lactée est un disque d'étoiles en rotation. Au début du XX^{e} siècle, l'astrophysicien américain Harlow Shapley contribua à mesurer les dimensions de la Galaxie et la position du Soleil dans cette structure. Il participa aussi dans les années 1920 au grand débat sur la nature des « nébuleuses » : s'agissait-il d'objets extragalactiques à l'image de la Voie lactée ? La question a été tranchée grâce aux travaux d'Edwin Hubble qui, en observant un certain type d'étoiles dans ces nébuleuses, a montré qu'elles étaient trop lointaines pour appartenir à la Voie lactée.

Avec l'amélioration des techniques, les astronomes ont pu observer en détail ces galaxies et les classer en fonction de leur morphologie : les galaxies spirales (telle la Voie lactée, dont la structure n'a été mise en évidence qu'en 1953), les galaxies elliptiques et les galaxies irrégulières *(voir la figure 2)*. Celles qui nous intéressent ici sont les galaxies spirales, elles-mêmes subdivisées en spirales à la structure dite régulière, avec typiquement deux bras symétriques, et d'autres avec plus de bras ou des bras courts et irréguliers.

Les connaissances sur les galaxies spirales sont surtout observationnelles et certains aspects restent mal connus. Par exemple, les astronomes se sont intéressés à la nature des bras spiraux. Si toute la matière de la galaxie est dans les bras et que les régions proches du centre tournent plus vite que les parties périphériques, un problème émerge : les bras s'enroulent trop vite et disparaissent en quelques révolutions galactiques. En 1964, les astronomes américains d'origine chinoise Frank Shu et Chia-Chiao Lin suggèrent que la galaxie est un disque de matière parcouru par des ondes qui la condensent dans certaines régions, formant les bras. Ce phénomène de propagation d'ondes de densité est similaire à ce qu'on observe dans les embouteillages de véhicules.

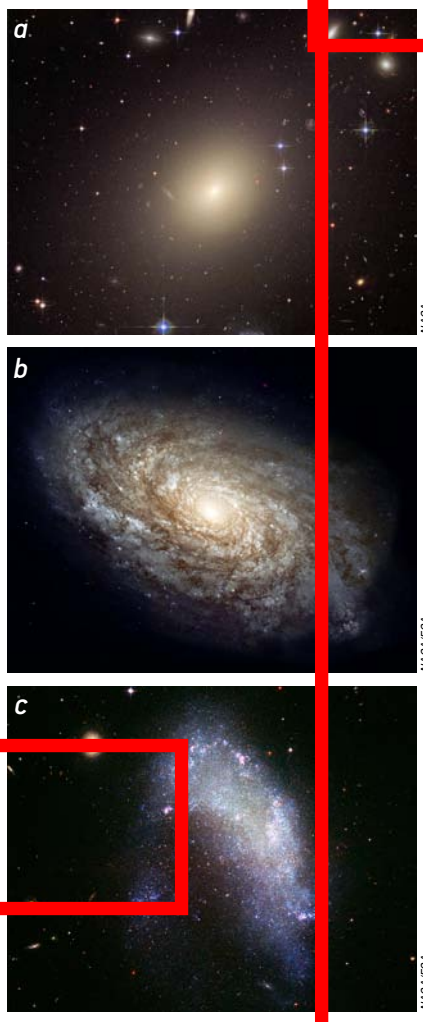
Le gaz galactique est la matière première des étoiles et les observations montrent que c'est surtout dans le gaz condensé des bras que se forment les nouvelles étoiles. Mais ces données ne suffisent pas pour décrire avec précision la dynamique du gaz galactique ou pour déterminer combien d'étoiles se forment dans la Galaxie chaque année et, surtout, par quels mécanismes.

En outre, il ne se forme quasiment pas de nouvelles étoiles dans les galaxies elliptiques. Le phénomène est spécifique aux galaxies spirales avec un processus cyclique : le gaz de la galaxie se condense en nuages dans les bras, ces nuages s'effondrent pour former des étoiles et, par le biais des supernovæ et des vents stellaires, les étoiles réinjectent de la matière dans le disque galactique.

Depuis une dizaine d'années, les astronomes ont développé des simulations numériques pour étudier le lien entre la dynamique galactique et la formation des étoiles, mais cette approche a été difficile à mettre en œuvre. En effet, les modèles de galaxies doivent prendre en compte les processus physiques qui gouvernent les gaz et les étoiles aux différentes échelles pertinentes : le diamètre d'une étoile est de l'ordre de 10^6 à 10^9 kilomètres, tandis que celui d'une galaxie spirale telle que la Voie lactée est de quelque 10^{18} kilomètres.

Une façon de simplifier le problème consiste à le hiérarchiser : examiner d'abord la formation des nuages de gaz, puis zoomer sur un nuage pour y étudier la naissance des étoiles. C'est l'approche que nous avons suivie avec mes collègues.

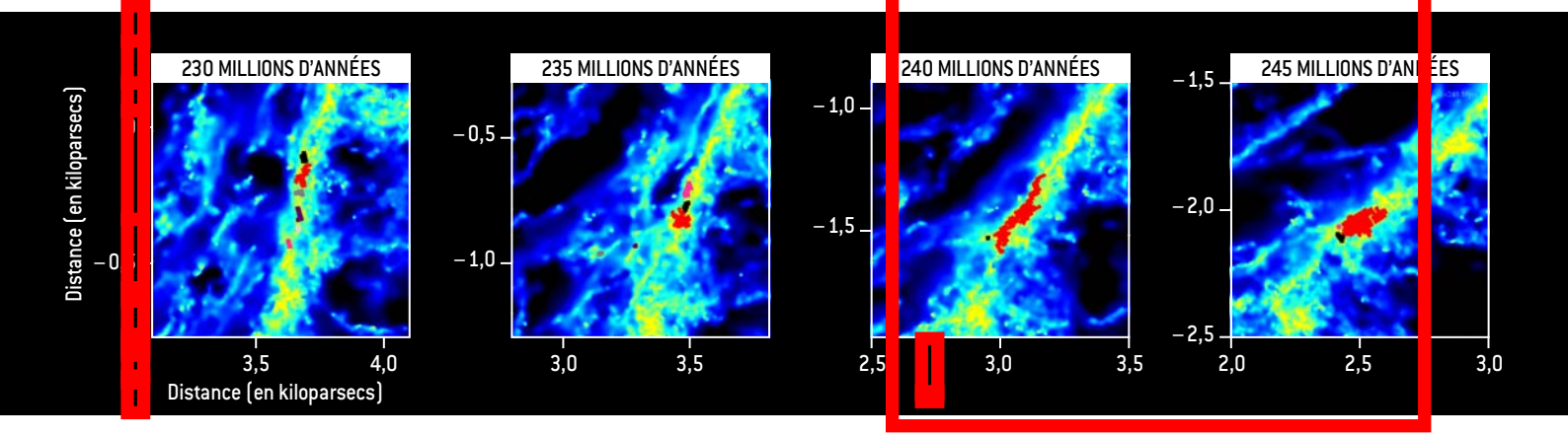
L'une de nos simulations *(voir la figure 1, à droite)* montre les régions où le gaz est le plus dense et forme des nuages berceaux des étoiles. L'aspect général est très proche de la structure de la galaxie spirale du Tourbillon (M51). Cet outil nous a permis de mieux comprendre la formation des étoiles dans une galaxie spirale. Je présenterai ici quelques aspects de ces simulations numériques et certains résultats de cette étude.



2. LES GALAXIES sont classées en fonction de leur morphologie : les galaxies elliptiques *(a)*, les galaxies spirales *(b)* ayant deux bras ou plus, et les galaxies irrégulières *(c)* sans structure discernable.

Formation des nuages

La première étape de la simulation est de reproduire la dynamique du gaz. Le code numérique que nous avons utilisé, nommé SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*, Hydrodynamique à lissage adaptatif), est capable de modéliser des écoulements et d'inclure les effets de la gravité. Ce programme traite le gaz comme un fluide, puis divise le fluide en un ensemble d'éléments discrets, ou particules. Les propriétés d'une particule dépendent de ses voisines, et peuvent varier en fonction des conditions locales, telles que la densité en particules. Cette méthode est bien adaptée à notre problème, car elle



© Pour la Science - n° 444 - Octobre 2014

peut décrire des phénomènes couvrant de nombreux ordres de grandeur.

Une galaxie est constituée majoritairement de matière noire (substance invisible, de nature inconnue, qui ne se manifeste que par ses effets gravitationnels) et d'étoiles. Pour économiser les calculs, leur influence dans la galaxie est implicitement incluse dans les modèles en utilisant un potentiel gravitationnel simple. Seule la dynamique du gaz est modélisée dans notre simulation.

La composition du gaz n'est pas uniforme. Les étoiles ne naissent que dans des nuages où le gaz est relativement froid (environ 10 kelvins) et dense (de l'ordre de 100 particules par centimètre cube). Parmi ces nuages, les plus massifs sont les nuages moléculaires géants, qui contiennent des molécules (principalement de dihydrogène, ou H_2). D'autres parties du milieu interstellaire sont par exemple constituées de gaz ionisé.

La gravité est la principale force en jeu dans la dynamique du gaz, mais il faut prendre en compte d'autres processus pour obtenir une galaxie très structurée, où le gaz s'organise en nuages moléculaires denses qui correspondent étroitement aux nuages géants réels.

Au sein d'un nuage, le gaz peut subir de nombreuses contraintes. L'existence d'une pression autorise la propagation d'ondes de choc. Lors des collisions entre différentes régions de gaz, ou entre petits nuages, les molécules perdent de l'énergie et de la vitesse, et le gaz émet un rayonnement. De ce fait, la température du gaz diminue à quelques dizaines de kelvins et conduit à la formation de nuages moléculaires géants. Par ailleurs, les instabilités gravitationnelles augmentent localement la densité dans un nuage ; il s'ensuit des collisions plus fréquentes et un refroidissement plus efficace.

Nous avons effectué des simulations démontrant que les instabilités gravitationnelles influent sur la structure du gaz pour les nuages les plus denses, alors que les processus de collision entre nuages dominent pour des densités plus faibles. Dans la simulation, l'essentiel de la structure est le résultat de collisions entre nuages, mais les nuages les plus gros (représentés en jaune) sont formés par autogravitation.

La rétroaction stellaire a une action inverse de celle de la gravité sur la répartition du gaz dans la galaxie simulée : le vent, le rayonnement ionisant des étoiles jeunes, la pression de radiation (la pression exercée par les photons des étoiles sur la matière environnante) et les explosions de supernovæ dispersent le gaz et le réchauffent.

LES ÉTOILES FORMÉES

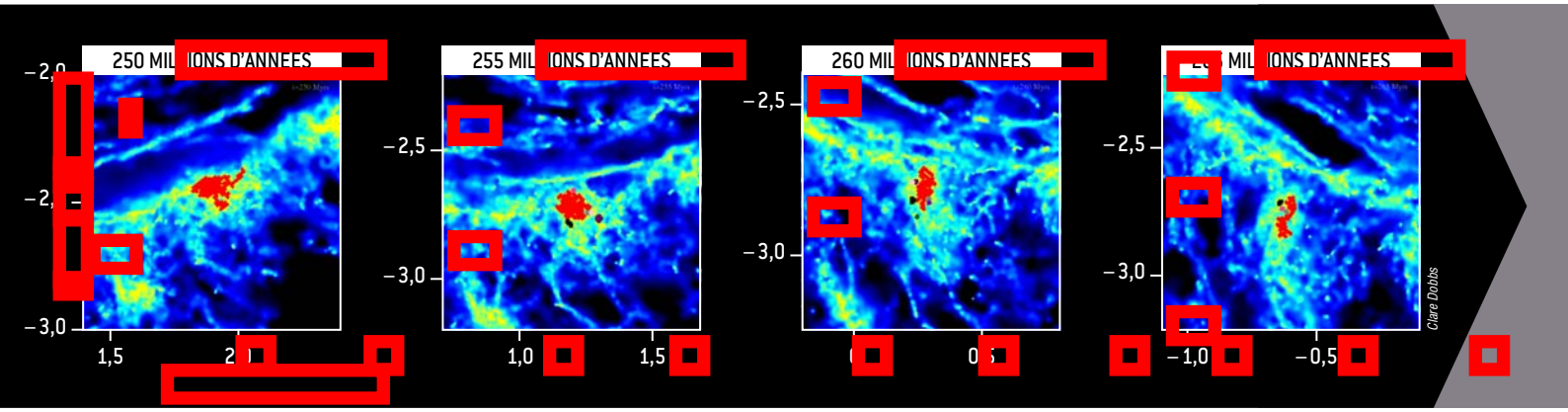
nt une action inverse de celle de la gravité sur la répartition du gaz : leur vent de particules et leur rayonnement dispersent ce gaz.

Grâce à la prise en compte de ces effets, la galaxie simulée présente de nombreux points communs avec la galaxie M51 *(voir la figure 1)*. Dans les deux galaxies, les nuages moléculaires et la formation stellaire sont concentrés dans les bras spiraux. On observe aussi des structures fines entre les bras, nommées éperons. Nous avons montré que les collisions de nuages sont peu fréquentes dans les régions entre les bras – ou dans les galaxies sans bras spiraux. Les instabilités gravitationnelles sont aussi renforcées dans les bras spiraux en raison de leur plus grande densité en gaz. Ces résultats confirment que les bras spiraux sont des milieux plus favorables à la formation des étoiles.

Nos simulations permettent de visualiser la formation des éperons. L'onde de densité qui forme les bras se déplace plus lentement que les étoiles ou les nuages denses qui se sont formés. Mais du fait de la rotation différentielle – la matière plus proche du centre galactique tourne plus vite que celle plus éloignée –, les nuages de gaz sont cisaillés et étirés, ce qui crée les éperons entre les bras.

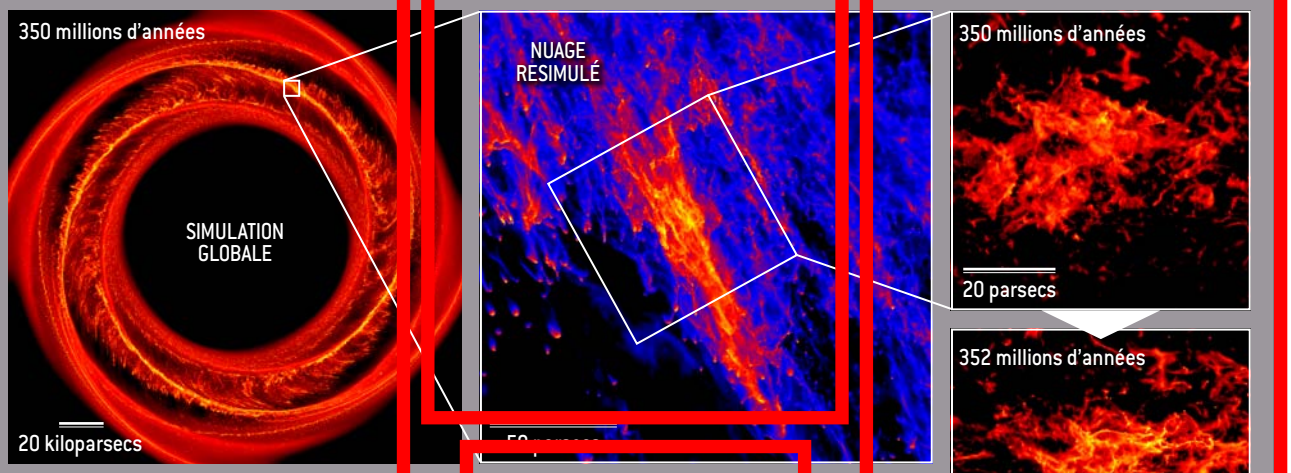
Nos simulations semblent reproduire plutôt fidèlement la dynamique des nuages de gaz. Nous avons commencé à les exploiter pour étudier le lien avec la formation des étoiles.

Les observations indiquent que la plupart des étoiles se sont formées lorsque la galaxie s'est constituée, ou peu de temps après. Cela est vrai pour les galaxies elliptiques et spirales. Ainsi, la plupart des étoiles de la Voie lactée datent de sa naissance il y a environ 12 milliards d'années. Le rythme de formation stellaire était alors plus élevé qu'aujourd'hui. Ce qui est surprenant, c'est que la Voie lactée et d'autres galaxies spirales forment encore des étoiles. D'après les dernières estimations, l'équivalent d'une étoile telle que le Soleil se forme chaque année dans la Galaxie. Mais ce chiffre est



3. CETTE FRISE montre l'évolution d'un nuage de gaz dans la simulation. Les dates sont données par rapport au début de la simulation. Le gaz se condense et forme un nuage *(en rouge)*. Ce dernier se déplace et se déforme à cause des forces de cisaillement. Les étoiles qui naissent dans le nuage émettent un vent de particules et un rayonnement qui dispersent le nuage.

ÉTUDIER UNE GALAXIE À DIFFÉRENTES ÉCHELLES



Pour étudier le lien entre la dynamique des nuages de gaz d'une galaxie spirale et la formation des étoiles, il faut s'intéresser à des phénomènes qui agissent à différentes échelles : environ 10^6 à 10^8 kilomètres de diamètre pour une étoile et 10^{18} kilomètres pour la Voie lactée. Une simulation numérique ne peut pas gérer simultanément une telle différence d'échelles. La stratégie adoptée par Clare Dobbs et ses collègues est de comme[illegible] galaxie[illegible] étudier la formation des nuages.

Ensuite, par une répétition de zooms, les chercheurs isolent une région de la galaxie autour d'un nuage puis regardent en détail ce qu'y passe.

Lors de chaque zoom, les « particules » de gaz – les éléments de volume représentant le gaz – sont divisées pour améliorer la résolution. Par exemple, entre la première et la deuxième image, la résolution en masse [illegible] facteur 256. Une fois qu'une zone sélectionnée est repeuplée de particules de gaz plus fines, les chercheurs simulent de nouveau les effets de la gravité pour voir le gaz se condenser dans de petites régions *(en jaune)*. Le gaz dans ces nuages est plus dense (environ 100 particules par centimètre cube) et refroidit à moins de 50 kelvins. Les conditions sont alors favorables pour voir émerger des étoiles.

une petite fraction du nombre d'étoiles qui se formeraient si les nuages moléculaires géants se transformaient en étoiles avec un rendement parfait. Quel est le processus qui empêche le gaz des galaxies spirales de s'effondrer pour donner des étoiles ? La rétroaction stellaire.

À l'exception des supernovæ, les processus de vent stellaire, d'ionisation et de pression de radiation ont lieu pendant toute la vie d'une étoile massive. Ils modulent la formation stellaire en injectant dans le milieu interstellaire de l'énergie, et dans certains cas de la matière, qui s'oppose à la gravité, au refroidissement et à l'effondrement des nuages. L'énergie injectée est proportionnelle au nombre d'étoiles dont on prédit la formation à partir des nuages de gaz moléculaire qui atteignent une certaine densité.

Si l'on effectue les simulations en doublant la fréquence de formation d'étoiles, la quantité d'énergie ajoutée au milieu interstellaire est aussi doublée, ce qui s'oppose à la formation des nuages. Ainsi, la compétition entre l'effondrement gravitationnel des nuages, qui forme des étoiles, et la rétroaction des étoiles, qui dissipe les nuages, évolue vers un équilibre. Le taux de formation stellaire diffère d'un facteur 100 selon que l'on prend la rétroaction en compte ou pas. Une telle régulation explique pourquoi les galaxies spirales produisent encore des étoiles aujourd'hui.

La vie d'un nuage

Une question qui s'est posée durant nos travaux est la durée de vie de ces nuages moléculaires. Ces milieux sont essentiels pour la formation des étoiles, mais s'agit-il de structures stables à longue durée de vie ? Dans les premiers modèles du milieu interstellaire, on supposait généralement que c'était le cas : les nuages étaient capables de se maintenir des dizaines de millions d'années. La gravitation assurait la cohésion des nuages moléculaires géants, mais les effets combinés de la turbulence et de la rotation les empêchaient de s'effondrer sur eux-mêmes, d'où leur équilibre.

Avec les progrès des observations, on a montré que les nuages présentent généralement une structure allongée, ce qui n'est pas caractéristique des objets à l'équilibre. De plus, plusieurs études récentes suggèrent que la durée de vie de ces nuages pourrait être courte : les étoiles se formeraient rapidement, puis perturberaient leur nuage de naissance par les processus de rétroaction stellaire.

Ces découvertes constituent un test pour nos simulations. Dans ces dernières, pour déterminer la durée de vie des nuages, il faut d'abord identifier ces structures, c'est-à-dire définir une valeur minimale de la densité locale à partir de laquelle on peut parler de nuage, puis difficulté ensuite de suivre le déplacement de ces nuages

© Pour la Science - n° 444 - Octobre 2014

dans la galaxie et leurs déformations. Nos simulations numériques mettent en évidence leur évolution (*voir la figure 3*). On peut ainsi voir le gaz se condenser pour former un nuage qui, après une certaine durée, se dissout. Nos calculs montrent que la durée de vie des nuages n'est que de quelques millions d'années, en accord avec les observations récentes.

Les nuages sont détruits par les effets combinés du cisaillement (dû à la rotation différentielle) et de la rétroaction stellaire. Quelques-uns des nuages moléculaires géants, en particulier les plus massifs, ont des durées de vie plus longues.

L'équilibre des forces qui assure la stabilité d'un nuage peut être étudié par une autre approche. Un énoncé général, le « théorème du viriel », suppose qu'un système est à l'équilibre si son énergie cinétique moyenne et son énergie potentielle sont égales. Dans le cas d'un nuage de gaz, l'énergie cinétique est déterminée par les vitesses des molécules du gaz, tandis que l'énergie potentielle est liée à l'attraction gravitationnelle du nuage. Si l'énergie potentielle domine, le nuage s'effondrement, si l'énergie cinétique domine, le nuage s'étiole. Nos simulations montrent que l'on est plutôt dans ce dernier cas. Ainsi, seules des régions locales dans les nuages vont s'effondrer et former des étoiles, mais les nuages dans leur ensemble ne s'effondrent pas.

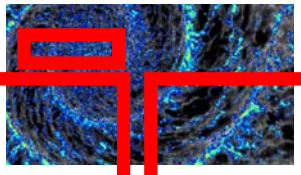
L'état non lié, gravitationnellement, de la plupart des nuages contribue à expliquer le faible taux de formation stellaire dans les galaxies. En outre, si les grands nuages ne sont pas liés, ils peuvent facilement se dilater après avoir quitté les bras et former les éperons observés entre les bras de nombreuses galaxies. Les nuages liés par autogravité, en revanche, ont tendance à conserver des formes presque sphériques. La rétroaction stellaire explique en partie pourquoi les nuages ne sont pas liés. Elle est source de mouvements dans le milieu interstellaire, « soufflant » les nuages et augmentant leur dispersion. Certains nuages moléculaires géants de notre simulation sont liés, mais leurs courtes durées de vie suggèrent qu'ils s'effondrent rapidement, forment des étoiles et disparaissent. En l'absence de rétroaction,

L'AUTEUR

Clare DOBBS effectue ses recherches au Département d'astrophysique de l'Université d'Exeter, en Grande-Bretagne.

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

EN VIDÉO



Les simulations animées de l'auteur : http://empslocal.ex.ac.uk/people/staff/cld214/movies.html

Palais découverte

les conférences

au Palais de la découverte

Entrée libre dans la limite des places disponibles

théma Cap sur l'invisible

Faut-il tuer le temps ?

> mardi 7 octobre à 19h

Débat exceptionnel sur la nature du temps entre les fondateurs de la théorie quantique à boucles, Lee Smolin (Perimeter, Canada) et Carlo Rovelli (Université de la Méditerranée, Marseille), animé par l'historien des sciences Michel Blay.

La structure des comètes, des hypothèses aux évidences

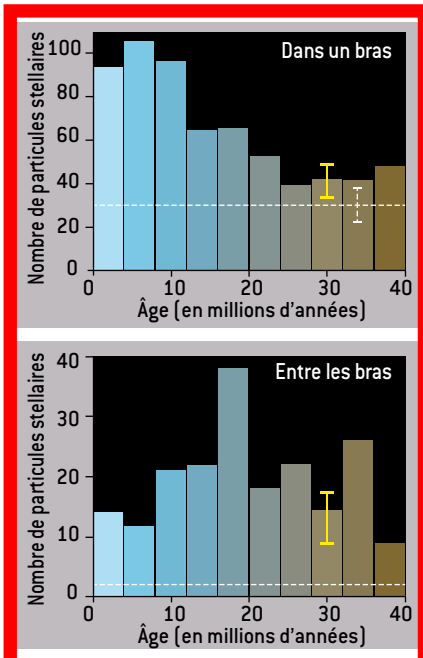
> samedi 25 octobre à 15h

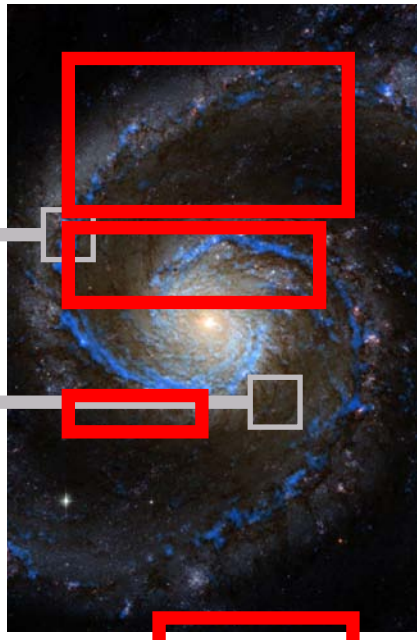
Conférence de l'astrophysicienne Anny-Chantal Levasseur, à l'occasion de la mission *Rosetta* (Agence spatiale européenne), en route vers la comète Churyumov-Gerasimenko.

En partenariat avec cnrs l'Observatoire de Paris dunod esa cnes

Avec le soutien de pour la science culture plus

programme complet sur palais-decouverte.fr





Claire Dobbs / PAWS team/IRAM/NASA HST/T. A. Rector (University of Alaska)

4. LA DISTRIBUTION DE L'ÂGE DES ÉTOILE[illegible] d'un nuage diffèr[illegible] selon la position de celui-ci dans la galaxie. Les étoiles sont relativement plus jeunes dans u[illegible] bras *(en haut)* qu'entre les bras *(en bas)*, les nuages s'étant d'abord form[illegible]s dans un bras avant de migrer.

es nuages sont pour la plupart liés, mais ils forment beaucoup trop d'étoiles.

Jusqu'à présent nous n'avons présenté que les résultats obtenus à l'échelle de la galaxie. Nous avons modélisé la formation et l'évolution des nuages moléculaires géants, mais, à de telles échelles, nous ne sommes pas en mesure de considérer les étoiles individuelles, ni même les amas de plusieurs étoiles. Nous ne pouvons pas obtenir mieux qu'une résolution de l'ordre de 100 masses solaires d'étoiles se formant à un moment donné. La rétroaction stellaire évoquée jusqu'à présent n'était incluse que de façon implicite dans la simulation.

Une façon d'explorer explicitement la formation stellaire consiste à zoomer sur une région de la galaxie. Dans cette approche, nous sélectionnons [illegible] et simulée de nouveau en la repeuplant avec davantage de particules plus petites, de façon à augmenter la résolution *(voir l'encadré page 52)*.

Par cette méthode, il est possible d'atteindre une valeur de 0,156 masse solaire par particule simulée. Un tel niveau de détail n'est pas encore tout à fait suffisant pour suivre la formation d'étoiles individuelles de type solaire, dont la masse correspond à moins de dix particules. Il est néanmoins possible de décrire une étoile d'au moins 11 masses solaires. Pour suivre la formation stellaire, nous insérons en général des « particules puits », qui remplacent 50 à 100 particules ordinaires, afin de représenter les endroits où des étoiles se sont formées. Ces insertions représentent soit des étoiles massives, soit de petits groupes d'étoiles.

Ces simulations à haute résolution aident à comprendre ce qui détermine la relation entre le taux de formation stellaire et la densité de gaz dans les nuages de la galaxie (ce qui correspond à la relation empirique dite de Schmidt-Kennicutt). Nous avons montré que les chocs entre nuages, liés aux plus grandes échelles galactiques, influent sur la quantité de nuages denses de gaz froid et que le nombre de ces nuages est lié à la production d'étoiles.

La rétroaction stellaire est indispensable pour obtenir des résultats corrects à cette échelle aussi. Si on ne la prend pas en compte, nous trouvons des taux de formation stellaire trop élevés par rapport aux taux observés et donnés par la relation de Schmidt-Kennicutt.

De la même façon que nous avons mesuré la durée de vie des nuages de gaz, nous pouvons estimer l'âge des étoiles dans un nuage moléculaire géant. La distribution de cet âge est reliée à l'évolution du nuage. Par exemple, Lee Hartmann, de l'Université du Michigan, et ses collègues ont montré qu'une prédominance d'étoiles jeunes est un indicateur de la formation récente du nuage moléculaire.

Mais leurs calculs ne prenaient en compte que de petits nuages d'environ dix masses solaires. Notre simulation globale a permis d'examiner la distribution des âges des étoiles (en l'occurrence de particules stellaires représentant chacune environ 100 masses solaires de formation stellaire dans ces simulations) sur des nuages plus grands, et cela dans les bras, entre les bras et dans les régions périphériques de la galaxie.

Notre analyse statistique montre que la distribution des âges est différente dans les bras spiraux et entre eux *(voir la figure 4)*. En effet, les nuages et les étoiles se forment dans les bras. Ces régions présentent une majorité d'étoiles jeunes. Comme l'onde de densité et les nuages ne se déplacent pas à la même vitesse, les nuages se retrouvent [illegible] les bras après une période de migration. Les étoiles y sont donc plus anciennes, avec un âge moyen de 20 millions d'années.

La compréhension physique de la formation stellaire par les astronomes a

Une façon d'explorer explicitement la formation stellaire consiste à effectuer une opération de zoom et se concentrer sur une région de la galaxie.

© Pour la Science - n° 444 - Octobre 2014

[illegible] progressé grâce [illegible] simulations numériques qui décrivent l'évolution du gaz et des étoiles au sein des galaxies. Nous commençons à montrer comment se comportent et évoluent les nuages moléculaires géants, et comment s'effectue la formation stellaire en leur sein.

Une vision globale de la galaxie

Cependant, ces simulations nécessitent des temps de calcul sur des superordinateurs. Il est donc impératif de simplifier les modèles pour optimiser le temps de calcul. Certains phénomènes ne sont pas pris en compte. Le champ magnétique galactique, par exemple, n'est pas considéré – un sujet de recherche important pour la suite, car il pourrait influer sur la dynamique et la [illegible] modèles des processus à grande échelle, comme les supernovæ et la rotation galactique. Par ailleurs, les simulations de galaxies considèrent des galaxies spirales régulières isolées, alors que la plupart de ces galaxies interagissent avec d'autres galaxies, ce qui influe sur la dynamique et la formation des bras spiraux.

La naissance des étoiles dans une galaxie est un phénomène complexe résultant de la compétition de forces liées à la gravité, l'électromagnétisme et la physique nucléaire : de la matière diffuse s'agglomère et se condense en donnant des étoiles, qui produisent alors de l'énergie par fusion et des éléments lourds par fusion thermonucléaire, laquelle disperse la matière.

Nous commençons seulement à comprendre cet équilibre subtil qui n'est pas sans conséquence pour l'apparition de la vie. Sans la formation des étoiles et de leur disque environnant de matériau accrété, il n'y aurait pas de planètes. Ainsi, l'étude des galaxies peut aider à comprendre non seulement la formation des étoiles, mais aussi celle des planètes. En faisant le lien entre ces processus à diverses échelles, depuis les étoiles jusqu'aux nuages moléculaires géants et aux galaxies entières, notre vision de l'Univers gagne en clarté et en profondeur. ■

BIBLIOGRAPHIE

C. L. Dobbs *et al.*, **The dependence of stellar age distributions on giant molecular cloud environment**, *MNRAS*, vol. 437, pp. L31-L35, 2014.

C. L. Dobbs et J. E. Pringle, **The exciting lives of giant molecular clouds**, *MNRAS*, vol. 432, pp. 653-667, 2013.

C. Bertout, **Étoile et disque protoplanétaire, compagnons de naissance**, *Dossier Pour la Science*, n° 64, juillet-septembre 2009.

C. L. Dobbs, **GMC formation by agglomeration and self-gravity**, *MNRAS*, vol. 391, pp. 844-858, 2008.

[illegible] **dans la mare galactique**, *Dossier Pour la Science*, n° 56, [illegible]

David Ecker

Des appareils capables d'identifier rapidement presque n'importe quel pathogène sont en cours de développement. En les installant dans des hôpitaux répartis sur tout le territoire et en les interconnectant, on pourrait détecter et maîtriser les épidémies de façon plus précoce.

Détecter les épidémies plus vite et plus tôt

Jusqu'au début du XXe siècle, la plupart des gens mouraient avant leur cinquantième anniversaire. Et les décès étaient principalement dus aux maladies infectieuses telles que la variole, la grippe ou la pneumonie.

Aujourd'hui, ces maladies ne tuent presque plus dans les pays développés, grâce à la découverte des antibiotiques et aux progrès dans les domaines de l'hygiène, de la nutrition et des vaccins. Cependant, elles pourraient bientôt causer à nouveau de multiples décès prématurés. L'une des raisons est l'émergence de nouveaux agents dangereux, tels le virus Ebola à l'origine de l'inquiétante épidémie de fièvre hémorragique [illegible] en Afrique. Une autre raison est que de nombreux micro-organismes deviennent résistants aux médicaments disponibles, que l'industrie pharmaceutique ne remplace pas assez vite.

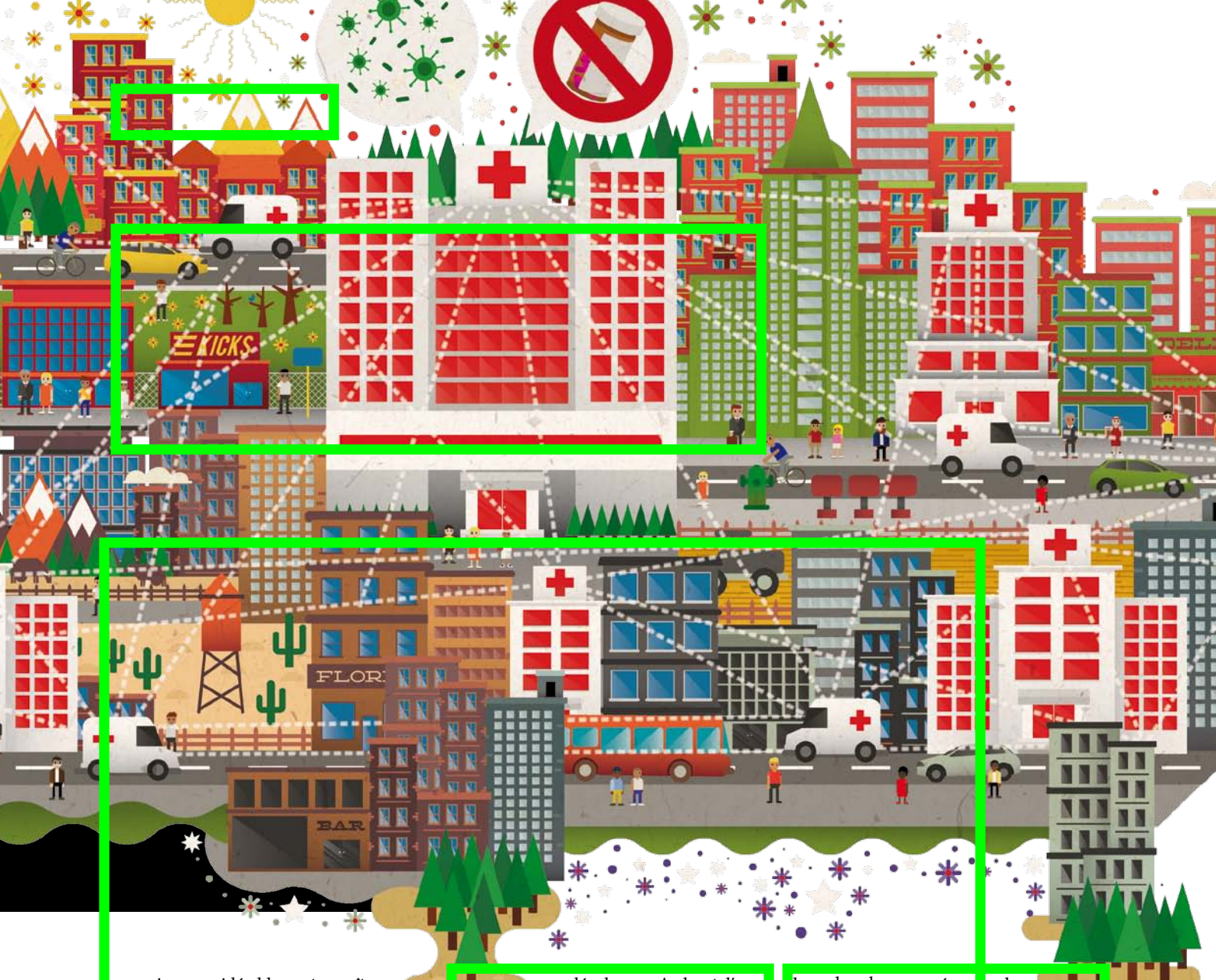
La prescription excessive d'antibiotiques est l'un des facteurs qui contribuent le plus aux insuffisances des outils de diagnostic actuels. Ces derniers ne peuvent déterminer rapidement, dans le cas d'une maladie bactérienne, quelle souche spécifique est en cause (les bactéries sont les seuls organismes sensibles aux antibiotiques). Dans la plupart des cas, on mène encore des [illegible], qui prennent plusieurs jours et qui nécessitent la multiplication préalable des bactéries pathogènes dans un milieu de culture.

Un retard dans le traitement d'un patient pouvant avoir de graves conséquences, les médecins parent souvent à toute éventualité en prescrivant de puissants antibiotiques à large spectre, c'est-à-dire efficaces contre une grande variété de bactéries. Cependant, chaque médicament sélectionne certaines souches résistantes. Leurs compétiteurs [illegible] se multiplient de façon incontrôlée et contaminent d'autres personnes. De telles pratiques médicales [illegible] patients aujourd'hui, finissent inévitablement l'émergence de bactéries plus résistantes aux antibiotiques.

La solution pourrait résider dans de nouveaux biocapteurs moléculaires en cours de développement. Ces dispositifs permettront aux médecins de déterminer rapidement le type d'infection (bactérienne ou non) et l'espèce de microbes en cause. De tels outils de diagnostic feront gagner un temps précieux en recherchant tous les pathogènes potentiels à la fois, au lieu de tester chaque micro-organisme l'un après l'autre. Mes travaux au sein de l'entreprise *Ibis Biosciences*, rattachée au groupe *Abbott*, posent les fondements d'un tel outil. D'autres entreprises cherchent à développer des produits similaires.

Ces appareils de diagnostic rapide sont proches d'une application commerciale et devraient être disponibles dans les centres médicaux d'ici quelques années. Nous

© Pour la Science - n° 444 - Octobre 2014



pourrions considérablement accroître leur intérêt en les interconnectant à l'échelle d'une nation, voire de la planète entière. Ils constitueraient alors le premier système d'alerte à grande échelle permettant de détecter précocement et en temps réel des maladies nouvelles, des intoxications alimentaires, des pandémies et d'éventuelles attaques bio-terroristes.

Des méthodes datant de plus de 150 ans

Les méthodes actuelles pour diagnostiquer les maladies infectieuses sont fondées sur des techniques de culture développées par Louis Pasteur il y a plus de 150 ans. On collecte un échantillon de tissu du patient – du sang, du mucus ou de l'urine, par exemple –, puis on le transfère dans un flacon empli de nutriments ou sur un support recouvert d'agar, un extrait d'algues gélatineux qui permet aux pathogènes de se développer. Au bout d'une journée ou deux, les microbes se sont tant multipliés que les techniciens de laboratoire peuvent les identifier. En examinant si ces cultures meurent en présence de médicaments variés et à quelle vitesse, on en profite pour tester l'efficacité des traitements médicamenteux.

Même si cette méthode était plus rapide, elle ne serait pas idéale. En effet, beaucoup de pathogènes sont difficiles à cultiver, par exemple parce qu'ils ne se multiplient que dans des milieux particuliers. La culture est même parfois vouée à l'échec, quand le prélèvement chez le malade a été réalisé après un premier traitement antibiotique.

J'ai commencé à m'intéresser au diagnostic et au suivi des maladies infectieuses quand je travaillais sur de nouvelles méthodes pour découvrir des antibiotiques, au sein de l'Agence américaine de projets de recherche avancés pour la défense. L'objectif était de trouver, parmi des milliers de candidats, des composants qui neutralisent de nombreuses espèces de bactéries différentes, en détruisant un segment d'ARN (un acide nucléique similaire à l'ADN et essentiel au fonctionnement de toutes les cellules vivantes) qu'elles ont en commun.

Avec mes collègues, nous avons utilisé des appareils nommés spectromètres de masse pour déterminer si les médicaments potentiels se fixaient à l'ARN bactérien. Ces appareils permettent de déterminer la masse des molécules avec une grande précision. En soustrayant à la masse totale obtenue celle, connue, de l'ARN bactérien, nous pouvions déduire la masse de n'importe quel composant qui y était collé – de la même façon qu'on pèserait un chien en montant avec lui sur une balance et en soustrayant son propre poids. Chaque composant ayant une masse unique, nous

Studio Iovedust

déterminions alors sa nature à partir de sa masse.

Nous avons remarqué que cette technique permettrait d'identifier des bactéries, des virus, des champignons et des parasites. Il suffirait de « peser » quelques brins bien choisis d'ARN ou d'ADN de ces organismes. Chaque brin est composé de sous-unités, ou nucléotides, souvent désignées par des lettres : A (adénine), C (cytosine), G (guanine) et soit U (uracil) pour l'ARN, soit T (thymine) pour l'ADN. Certaines séquences d'acides nucléiques sont caractéristiques de pathogènes donnés.

Retrouver la composition d'un ARN à partir de sa masse

Comme les poids moléculaires des nucléotides diffèrent notablement l'un de l'autre, on peut déterminer la composition d'un brin particulier à partir de sa masse. Par exemple, un brin d'ADN pesant 38 765,05 daltons (le dalton correspond à 1/12e de la masse de l'atome de carbone ^{12}C et vaut environ $1{,}66 \times 10^{-27}$ kilogramme) contient les nucléotides suivants : 43 adénines, 28 guanines, 19 cytosines et 35 thymines. Cette combinaison est la seule à donner cette masse moléculaire précise sans avoir recours à des fractions de nucléotide, qui n'existent pas dans la nature. On déduit ensuite de cette composition l'espèce de micro-organisme correspondante.

Pour identifier les pathogènes, on doit distinguer leur ADN ou leur ARN de ceux du patient dans l'échantillon. La plupart du temps, la quantité d'ADN ou ARN étranger présente dans les cultures ne suffit pas pour les mesures et il faut en réaliser des copies. Au lieu d'attendre que les microbes se développent en culture, on utilise une technique nommée amplification par PCR (pour *Polymerase Chain Reaction*, ou réaction en chaîne par polymérase), où des enzymes [illegible] nucléiques et amplifient ainsi la quantité d'ADN ou d'ARN présente. La PCR sert à détecter des pathogènes depuis longtemps, mais seulement quelques-uns d'entre eux à la fois. Mes collègues et moi l'avons couplée à la spectrométrie de masse, afin de développer une méthode qui autorise la détection simultanée de nombreux organismes.

La clef est de limiter la quantité d'acide nucléique à multiplier par PCR pour obtenir un diagnostic certain. Nous y parvenons en étant très sélectifs sur les segments d'ADN ou d'ARN à dupliquer. Nous ne nous intéressons qu'à des séquences de nucléotides connues pour contenir deux sous-régions adjacentes très utiles pour le diagnostic : l'une est commune à tout un groupe de bactéries (par exemple le groupe des bactéries qui se colorent de façon spécifique dans un test nommé coloration de Gram, au fondement de la classification des bactéries depuis le XIXe siècle) et l'autre est spécifique d'une espèce au sein de ce groupe (par exemple le staphylocoque doré, *Staphyloccoccus aureus*). Cibler de multiples séquences de ce type permet d'identifier des catégories et des sous-catégories sans allonger inutilement la procédure.

Après avoir extrait l'ARN ou l'ADN des micro-organismes, nous leur ajoutons des amorces, c'est-à-dire de courts morceaux d'ADN similaires à ceux qui amorcent la copie des nucléotides dans une cellule vivante. Ces amorces se fixent sur les fragments ciblés, qui sont multipliés par les enzymes de la PCR. Nous « pesons » ensuite les fragments au moyen du spectromètre de masse, puis nous comparons les valeurs obtenues avec celles d'une base de données, où nous avons répertorié les caractéristiques de plus d'un millier d'organismes connus pour être infectieux chez les humains. Ce dispositif constitue un détecteur universel de pathogènes, capable d'identifier le vecteur de la maladie chez un patient en seulement quelques heures.

Un prototype testé en 2009

Un prototype a été testé dans des conditions réelles en 2009, lorsqu'une fillette de neuf ans et un garçon de dix ans, habitant à deux endroits différents du Sud de la Californie, ont présenté des symptômes ressemblant à ceux de la grippe. Un frottis de la gorge (prélèvement de cellules en raclant la surface) a été effectué chez ces enfants et les échantillons ont été soumis à des tests rapides et standards de dépistage de la grippe. Les résultats suggéraient que le virus de la grippe était bien responsable de la maladie, mais ne permettaient pas d'identifier la souche en cause.

Les échantillons ont été envoyés à la ville voisine de San Diego, où le Centre de recherche médicale de la marine testait

L'AUTEUR

David ECKER est chercheur et inventeur chez *Ibis Biosciences*, une filiale de la compagnie pharmaceutique américaine *Abbott*.

L'ESSENTIEL

- **On développe des détecteurs capables d'identifier en quelques heures une bactérie, un virus ou un parasite ayant contaminé un malade.**
- **Grâce à ces biocapteurs, les patients recevraient un traitement adéquat plus tôt et les médecins ne prescriraient plus inutilement certains antibiotiques.**
- **L'interconnexion d'un petit nombre de ces détecteurs permettrait de repérer les épidémies de façon précoce.**
- **Les principaux obstacles à la création d'un tel réseau ne sont pas techniques, mais d'ordre institutionnel.**

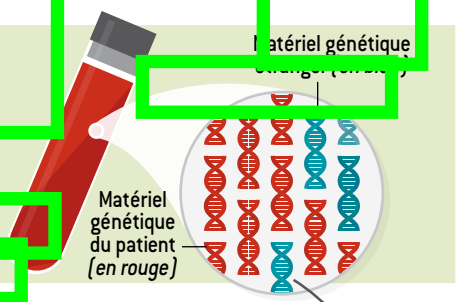
© Pour la Science - n° 444 - Octobre 2014

DES DÉTECTEURS RAPIDES DE PATHOGÈNES

Chez l'homme, quelque 1 000 pathogènes sont susceptibles de causer une maladie. On cherche à développer des appareils capables d'identifier rapidement lequel est présent chez un patient, grâce à une combinaison d'outils empruntés aux mathématiques, à la physique et à la biologie. Un réseau de tels détecteurs de pathogènes, répartis sur le territoire, pourrait émettre des alertes précoces lors du déclenchement d'une épidémie ou d'une attaque biologique. Ces appareils aideraient aussi à choisir les traitements les plus efficaces.

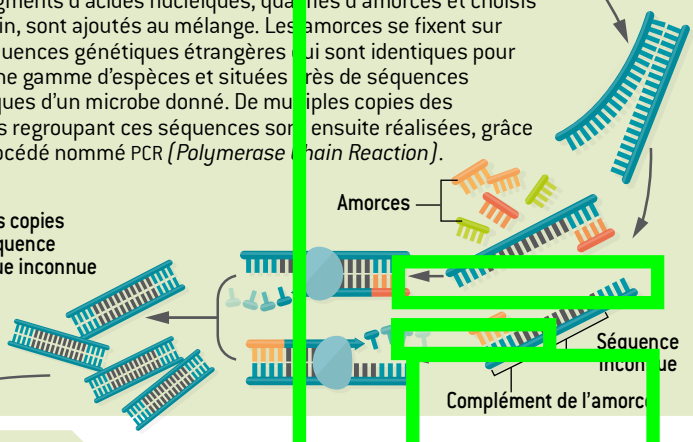
Étape 1

Un technicien fait une prise de sang à un malade. La majorité du matériel génétique (composé d'acides nucléiques) présent dans un échantillon prélevé du patient, mais une petite partie appartient à l'organisme qui cause la maladie.



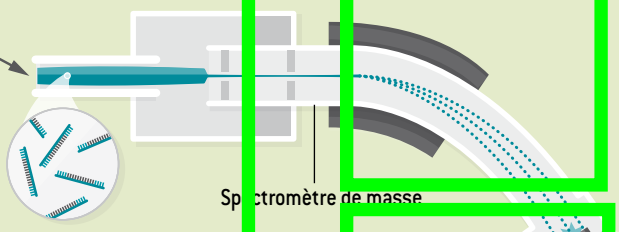
Étape 2

Des fragments d'acides nucléiques, qualifiés d'amorces et choisis avec soin, sont ajoutés au mélange. Les amorces se fixent sur des séquences génétiques étrangères qui sont identiques pour toute une gamme d'espèces et situées près de séquences spécifiques d'un microbe donné. De multiples copies des sections regroupant ces séquences sont ensuite réalisées, grâce à un procédé nommé PCR *(Polymerase Chain Reaction)*.



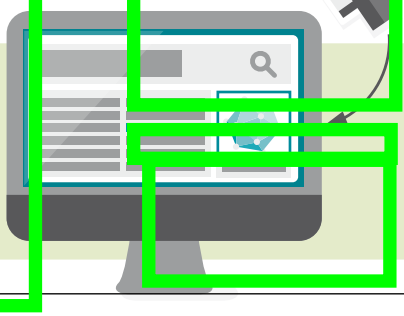
Étape 3

Un appareil nommé spectromètre de masse détermine la masse moléculaire du matériel génétique amplifié. On déduit de cette mesure la composition en acides nucléiques des séquences inconnues.



Étape 4

On détermine l'identité du pathogène en comparant la composition en acides nucléiques de ses séquences génétiques avec celles de virus, bactéries ou champignons répertoriés dans une base de données.



Lucy Reading-Ikkanda

notre prototype. Ce dernier a déterminé que les deux enfants avaient été infectés par la même souche virale, alors inconnue. Le dispositif a aussi permis de montrer que le virus avait été récemment transmis à l'homme par les porcs, car son ARN était voisin des souches de grippe répertoriées chez ces animaux. En outre, il correspondait à des échantillons plus tardifs de ce qui allait bientôt être connu comme le virus pandémique de la grippe porcine (H1N1).

L'alerte précoce lancée lors de la découverte de ces deux premiers cas a-t-elle sauvé des vies ? On ne peut l'affirmer, mais elle n'a certainement pas fait de mal, et une technique routinière capable d'identifier une nouvelle souche virale serait en tout cas précieuse pour repérer des débuts d'épidémie.

Les détecteurs universels de pathogènes doivent encore faire leurs preuves dans des situations où les médecins n'ont aucune idée de ce qui rend leurs patients malades. Ils peuvent aussi aider à la prescription de médicaments. En effet, l'identification de la souche de bactéries en cause renseigne sur la sensibilité du pathogène aux différents antibiotiques, et permet de prescrire immédiatement les plus appropriés. Les patients guériraient ainsi plus vite, même quand ils sont infectés par des souches résistantes, car ils recevraient plus tôt le traitement optimal.

Une révolution pour l'épidémiologie

De telles machines permettront aussi aux cliniciens de déterminer rapidement si plusieurs habitants d'une région ont été infectés [illegible] telle la salmonelle, une cause répandue d'intoxication alimentaire. Lors d'une enquête épidémiologique, la méthode classique consiste à interroger les patients et à retracer leurs déplacements récents, afin de trouver leur éventuel point commun – comme la fréquentation d'un restaurant particulier ou l'ingestion d'un même ingrédient présent dans une salade.

Cette méthode a été appliquée dès le milieu du XIXe siècle. Le médecin britannique John Snow s'en est ainsi servi à Londres en 1854 pour identifier l'origine d'une épidémie de choléra : il est alors remonté jusqu'à une pompe à eau collective. Une telle enquête peut prendre des semaines, voire des mois. C'est pourquoi

on ne l'entreprend que pour les épidémies les plus graves.

Il y aurait pourtant une meilleure méthode – et l'un des instruments nécessaires est probablement dans votre poche ou votre sac à main en ce moment même. Aujourd'hui, la plupart des gens se déplacent avec un téléphone mobile, qui conserve les données de géolocalisation dans le système d'exploitation ou dans une application accessoire. En outre, les informations recueillies par les opérateurs de téléphonie auprès des antennes relais permettent de suivre les allers et venues d'une personne. Quand des patients sont infectés par des organismes présentant un danger de santé publique, on pourrait ainsi, moyennant leur accord, étudier l'historique de leurs déplacements récents. Les épidémiologistes pourraient alors déterminer rapidement si plusieurs patients touchés par les mêmes organismes ont visité un endroit identique dans une certaine fenêtre de temps.

Comme dans les enquêtes épidémiologiques classiques, la vie privée des personnes devra être respectée. La différence est que l'on obtiendrait les réponses bien plus vite. Avec les données d'un réseau bien conçu de détecteurs universels de pathogènes, on pourrait identifier presque en temps réel des menaces pour la santé publique telles qu'un début d'épidémie, une attaque bioterroriste ou une contamination grave d'aliments. Mieux, les experts connaîtraient immédiatement l'origine de l'infection et l'importance de sa dissémination. Les résultats pourraient être communiqués aux patients ou aux autorités de santé, et les médecins transmettraient les informations sur les traitements efficaces. Avec un tel système, les domaines du diagnostic et de l'épidémiologie quitteraient enfin le XIXe siècle pour entrer dans le XXIe.

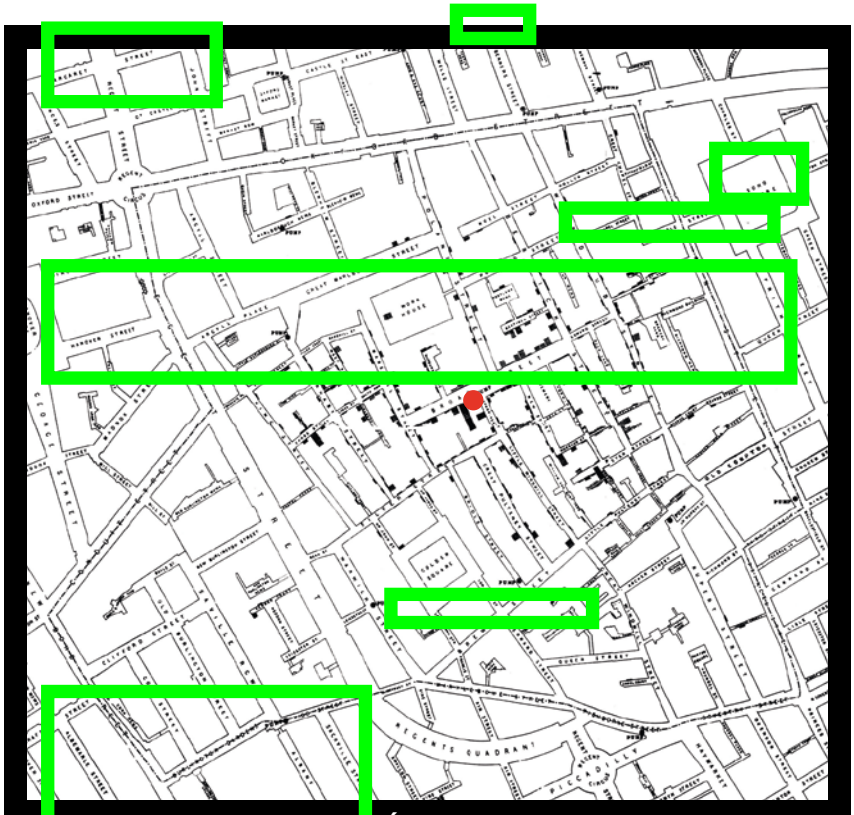
Combien de détecteurs de pathogènes le réseau doit-il comporter pour constituer un système d'alerte efficace à l'échelle d'un pays ou d'une région ? L'une des façons les plus simples d'aborder la question est d'utiliser une simulation dite de Monte Carlo, où un ordinateur répète un même scénario dans de multiples conditions différentes choisies aléatoirement afin de déterminer une gamme de résultats possibles. Dans un modèle de propagation des épidémies, j'ai rentré des données épidémiologiques américaines concernant les taux d'infection, les lieux où les malades se rendent pour obtenir des soins, le nombre de tests diagnostiques commandés et les durées d'incubation d'une vaste gamme d'organismes infectieux. Puis j'ai effectué les calculs des milliers de fois, afin d'évaluer la taille à partir de laquelle le réseau pourrait détecter de façon précoce un organisme menaçant la santé publique.

200 détecteurs de pathogènes suffiraient pour les États-Unis

Les résultats ont été impressionnants. Connecter au réseau 200 hôpitaux répartis à travers le pays suffirait pour couvrir toute la population des métropoles américaines. Chaque région urbaine de la taille de Washington ou de San Diego nécessiterait environ cinq hôpitaux dotés de détecteurs universels de pathogènes connectés au réseau. Il y aurait alors 95 pour cent de chance de détecter immédiatement un agent infectieux préoccupant pour la santé publique (grippe aviaire, maladie du charbon, peste, pathogène d'origine alimentaire, etc.) si seulement sept personnes atteintes se rendaient dans un service de soins d'urgence.

Le nombre étonnamment petit de machines [illegible] réseau) est dû à des « effets d'entonnoir ». La plupart des malades restent à la maison pour se soigner seuls, mais les plus atteints se déplacent jusqu'à un hôpital (le premier entonnoir), où des médecins (le second entonnoir) décident s'ils doivent subir des tests. Les machines sont placées au bout de ce second entonnoir. En d'autres termes, on n'a pas besoin d'installer des détecteurs partout ; suffisamment de malades « adéquats » se dirigeront d'eux-mêmes vers les détecteurs.

J'ai effectué des simulations pour les maladies infectieuses les plus communes et les plus graves, avant de comparer les performances d'un tel réseau avec celles du système d'alerte actuel. Le « Réseau menace », comme je l'ai surnommé, s'est révélé bien plus efficace pour détecter les nouvelles épidémies. Il identifiait le front de propagation de ces dernières plusieurs



LA CARTOGRAPHIE DES CAS DE CHOLÉRA *(en noir)* en 1854 à Londres a amené le médecin John Snow jusqu'à la source de la maladie : une pompe publique, dont l'eau avait été contaminée par des matières fécales *(point rouge)*. Cette méthode est toujours utilisée aujourd'hui, mais le réseau de détecteurs de pathogènes proposé par l'auteur permettrait de déterminer l'origine d'une épidémie bien plus vite.

© Pour la Science - n° 444 - Octobre 2014

Une révolution qui réduira les inégalités Nord-Sud

Comme l'explique l'article de David Baker, les techniques modernes de biologie et de communication pourraient révolutionner le diagnostic précoce des épidémies et améliorer la prise en charge des patients grâce aux progrès réalisés au cours de la dernière décennie.

Ce qui apparaissait comme de la science-fiction il y a peu est devenu de l'ordre du raisonnable. Outre la méthode décrite dans l'article, d'autres outils sont en cours de développement. Frank Aarestrup, de l'Université technique du Danemark, coordonne ainsi le projet *Global Microbial Identifier* (Identificateur mondial de microbes), ou GMI, qui regroupe 140 chercheurs du monde entier. Ce projet vise à construire une base de données sur les pathogènes (bactéries, virus, parasites et champignons), dont le génome complet sera obtenu grâce à de nouvelles techniques de séquençage. Celles-ci permettront d'harmoniser les données partielles collectées, parfois à l'aide de techniques différentes par divers laboratoires. Le projet GMI répertoriera en outre diverses métadonnées sur les pathogènes (lieux où on les trouve, traitements existants, etc.) et proposera des algorithmes pour analyser les échantillons prélevés sur les patients.

Lancé en 2011, ce projet devrait aboutir à une base de données opérationnelle en 2020. J'ignore quel réseau de diagnostic sera finalement le plus utilisé, mais je suis presque sûr que nous ne travaillerons plus de la même façon à très brève échéance.

Ces développements technologiques, coûteux, ne risquent-ils pas d'accroître les inégalités Nord-Sud face aux maladies infectieuses ? *A priori* non : ils pourraient même contribuer à les réduire. En effet, il est plus simple de prélever les échantillons et de les transporter vers de grands centres, où des appareils de diagnostic universels et très rapides seront disponibles, que d'appliquer localement de multiples techniques, chacune testant une maladie spécifique, comme on le fait aujourd'hui. Les techniques telles que la PCR, pratiquées avec de petits robots simples à utiliser, vont probablement être déployées. En effet, les appareils nécessaires sont peu adaptés aux pays les plus pauvres, où une alimentation électrique n'est pas disponible partout et où la chaîne du froid, essentielle pour les réactifs, est souvent rompue. La liaison avec les médecins restés sur place pourra être assurée grâce aux téléphones portables intelligents, dont chacun dispose, et les disparités dans la transmission des résultats seront ainsi encore atténuées.

Cependant, ni le sida, ni les Ebola ne disparaîtront par un coup de baguette magique moléculaire ou électronique. La lutte contre les principales épidémies passera encore et toujours par une prise de conscience politique conduisant à l'attribution de moyens adéquats à grande échelle, ainsi que par le dévouement des soignants.

– Antoine Andremont
Hôpital Bichat-Claude Bernard, Paris

jours à plusieurs semaines avant le système en place. Or détecter une épidémie ne serait-ce que quelques jours plus tôt peut sauver des milliers de gens, en permettant aux hôpitaux de se préparer à un afflux de personnes, aux autorités sanitaires de puiser dans les réserves de médicaments, voire aux enquêteurs de déterminer l'origine de la maladie.

Selon mes calculs, l'établissement d'un réseau de 200 hôpitaux coûterait environ 40 millions de dollars (près de 30 millions d'euros), en supposant que chacun achète son propre détecteur de pathogènes, et le fonctionnement du réseau demanderait 15 millions de dollars (11 millions d'euros) par an. Pour comparaison, une étude de 2012 a estimé le coût, aux États-Unis, des soins et des absences au travail associés aux 12 causes les plus communes de maladies graves d'origine alimentaire : il s'élève à 14 milliards de dollars (10 milliards d'euros) par an.

Il n'existe encore aucun système de surveillance épidémiologique aussi élaboré que le « Réseau menace ». L'expérience suggère que la conception des appareils et des logiciels sera la partie la plus facile, mais qu'il faudra prendre en compte de nombreux paramètres réglementaires ou légaux. Le plus grand obstacle est que, dans les pays où les systèmes de santé sont décentralisés et privés pour la plupart, personne n'a le mandat ou le pouvoir de lancer seul une telle entreprise – malgré l'intérêt collectif qu'elle présente. Le « Réseau menace » nécessitera une coopération intense entre les médecins, les infirmières, les administrateurs des hôpitaux, les experts de la santé et les défenseurs de la vie privée, coopération qui peut être difficile en l'absence d'une autorité centrale.

Une approche du diagnostic des maladies infectieuses intégrée à l'échelle d'une société entière sera plus efficace et beaucoup moins coûteuse que l'approche classique. Surveiller la santé publique en temps réel ou presque, en se fondant sur les nouvelles technologies de diagnostic et de communication, permettrait d'améliorer les soins, d'économiser des médicaments et d'émettre des alertes précoces grâce auxquelles les épidémies et les éventuelles attaques bioterroristes seraient maîtrisées plus tôt. Reste à montrer que nous avons assez de sagesse pour combiner nos efforts et bâtir un système de surveillance sanitaire plus intelligent. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

J. J. Farrell *et al.*, **« Salvage microbiology » : Detection of bacteria directly from clinical specimens following initiation of antimicrobial treatment,** *PLoS One*, vol. 8(6), e66349, 2013.

R. Sampath *et al.*, **Comprehensive biothreat cluster identification by PCR/electrospray-ionization mass spectrometry,** *PLoS One*, vol. 7(6), e36528, 2012.

D. J. Ecker *et al.*, **Ibis T5000 : A universal biosensor approach for microbiology,** *Nature Reviews Microbiology*, vol. 6, pp. 553-558, 2008.

Des pyramides de PONZI dans l'économie

De nombreuses pratiques économiques ordinaires s'apparentent aux systèmes de Ponzi, montages financiers frauduleux où les premiers investisseurs sont rémunérés grâce aux fonds apportés par les suivants.

Kaushik Basu

L'ESSENTIEL

- Voler Pierre pour payer
- des chaînes de Ponzi fait partie intégrante de l'activité économique depuis longtemps.
- se révèlent plus répandus dans les économies modernes
- Le fonctionnement des bulles financières est similaire à celui d'un système de Ponzi. Et des pratiques économiques ordinaires camouflent parfois un tel système.

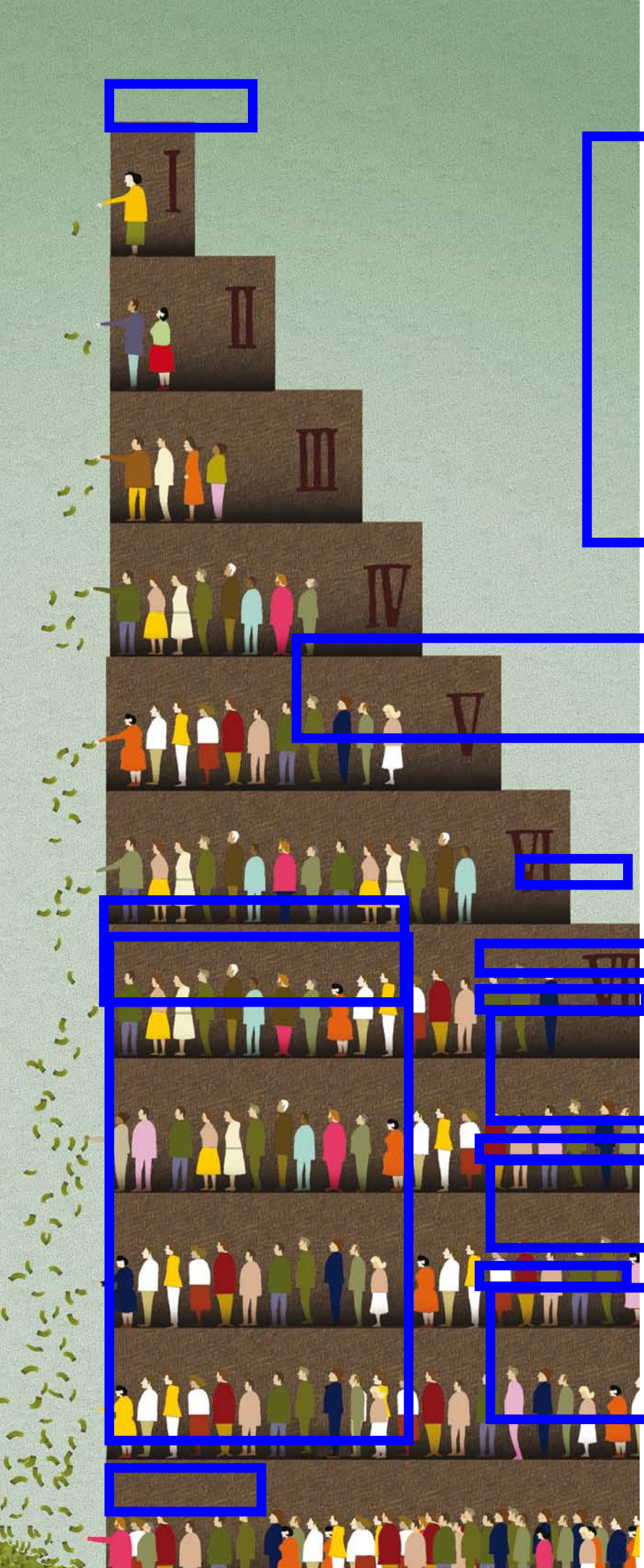
Le système de Ponzi est une composante récurrente de la vie économique des nations, riches et pauvres, et cela au moins depuis le XIXe siècle. Il permet à quelques-uns de devenir millionnaires tout en gâchant la vie de millions d'autres. Pourtant, la plupart des gens n'ont qu'une très vague idée de ce que sont ces montages, ce qui explique sans doute pourquoi tant de personnes continuent d'en être victimes.

Ce sujet a évidemment suscité de l'intérêt depuis la récente crise financière mondiale et les gros titres sur le scandale Bernard Madoff, la plus grosse escroquerie de Ponzi jamais organisée, découverte au plus fort de la tourmente financière. Tous ceux qui ont suivi cette affaire pensent probablement que les chaînes de Ponzi sont des duperies délibérées : au lieu d'utiliser l'argent des investisseurs pour financer une entreprise productive, l'escroc utilise celui apporté par les nouveaux investisseurs pour verser des intérêts aux investisseurs plus anciens. Mais les économistes ont commencé à se rendre compte que ce type de comportement peut aussi se produire spontanément, et même inconsciemment, simplement quand les anticipations des uns nourrissent celles des autres et créent une spéculation frénétique, une « bulle » économique qui grossit et qui finit par éclater.

Les spécialistes de l'étude des marchés financiers et les économistes comportementaux commencent à comprendre que les processus de type Ponzi peuvent être présents de façon endémique dans le flux et le reflux des marchés financiers mondiaux, comme s'il s'agissait de phénomènes naturels tels que les marées océaniques ou les éclipses de lune. Pour exister, ils n'ont pas besoin d'un agent malveillant tel que B. Madoff.

En fait, les systèmes de Ponzi peuvent revêtir de nombreuses formes différentes, ce qui les rend difficiles à détecter et isoler de telle façon que l'on puisse prendre d

Adam Simpson



mesures de contrôle ou engager des actions judiciaires. Mes propres recherches se sont concentrées sur un « système de Ponzi camouflé » très difficile à discerner, grâce auquel on manipule le fonctionnement d'une entreprise pour la maintenir provisoirement à flot, un système qui n'enfreint aucune loi mais qui peut avoir des effets dévastateurs sur l'économie.

Si les systèmes de Ponzi font l'objet d'un intérêt accru, ce n'est pas seulement à cause de la crise et des gros titres de la presse. Comme des recherches récentes l'ont montré, ces montages sont éclairés en partie par une analyse scientifique, qui révèle leur structure mathématique sous-jacente, et en partie par la psychologie de l'escroc, qui exploite notre candeur innée. Ces travaux laissent espérer que nous parviendrons à détecter précocement les produits financiers nocifs, avant que des milliers de personnes ne se fassent piéger [illegible] désarrois profonds.

L'escroquerie de base

Le système de Ponzi est en fait plus vieux que Carlo (« Charles ») Ponzi lui-même (1882-1949). Ponzi a inauguré son escroquerie en 1920 en Nouvelle-Angleterre, mais le système était sans doute répandu auparavant, comme l'attestent les personnages peu scrupuleux des romans de Charles Dickens, inspirés par les fraudes [illegible] l'investissement à haut rendement dans le Londres de l'époque victorienne ; et à vrai dire, il est probable que des combines consistant à « voler Pierre pour payer Paul » aient existé sous une forme ou une autre depuis que les humains vivent au sein de grands groupes.

Comme l'affaire Madoff l'a si bien montré, le ressort de base de la pyramide de Ponzi est une promesse d'enrichissement rapide qui, avec un peu de génie marketing, peut fonctionner... jusqu'à ce que l'édifice s'effondre. Dans la chaîne de Ponzi classique, l'escroc promet par exemple un retour sur investissement mirifique de 10 % par mois pour persuader quelqu'un d'engager 100 euros. Le mois suivant, deux personnes placent 100 euros chacune, et le premier investisseur récupère 10 euros tandis que l'entrepreneur « à la Ponzi » en garde 190. Ainsi, la pyramide des placements ne cesse de croître. En commençant avec les 100 euros placés le

■ **L'AUTEUR**

Kaushik BASU est premier vice-président et économiste en chef de la Banque mondiale, ainsi que professeur d'économie à l'Université Cornell, aux États-Unis.

premier mois, et en doublant le nombre d'investisseurs chaque mois, le revenu au dixième mois atteint 46 090 euros. Les personnes qui réussissent à monter des chaînes de Ponzi amassent ainsi des fortunes considérables. Le problème, c'est qu'il n'y a pas moyen d'arrêter la chaîne convenablement : tout s'effondre quand les nouveaux investissements se tarissent.

Mais ce qui rend la chaîne de Ponzi si séduisante, c'est qu'on ne peut pas déterminer à l'avance le moment où se produira le krach. Si c'était le cas, les chaînes de Ponzi ne seraient pas si pernicieuses. Personne n'investirait un mois avant le krach, et sachant cela, personne n'investirait deux mois avant le krach, et ainsi de suite. Dans cette logique implacable du raisonnement par récurrence dite rétrograde ou descendante, l'escroquerie aurait peu de chance de démarrer.

Des pyramides naturelles… ou non

L'absence de point d'implosion défini soulève un paradoxe psychologique important. En fin de compte, on peut considérer une chaîne de Ponzi comme une folie collective. Toutefois, dans la perspective d'un individu donné, il n'est pas intrinsèquement irrationnel d'investir dans une telle chaîne, parce que ce fragile édifice peut mettre longtemps avant de s'effondrer.

Les bulles financières ont rejoint assez récemment l'assortiment disparate des chaînes de Ponzi. Leur statut de système de Ponzi a été reconnu depuis que l'on s'est rendu compte que la psychologie d'un investisseur est toujours la même, que l'argent aille à un agent immobilier, à un agent de change ou à un escroc. Dans tous les cas, c'est l'augmentation continue des prix (ou plus précisément les anticipations de reprise) qui permet au processus de perdurer. C'est ce qui a conduit l'économiste Robert Shiller, de l'Université Yale, à qualifier les bulles financières de systèmes de Ponzi naturels, c'est-à-dire des bulles qui se forment non pas sous l'effet de la carotte d'un manipulateur, mais sous l'effet des forces naturelles du marché, les anticipations d'une personne nourrissant celles de la suivante.

Nous avons assisté à cela sur le marché de l'immobilier et, au fil des époques, sur les marchés de l'or, où certains souhaitent acheter un bien pour l'unique raison que d'autres le convoitent aussi, et que donc les prix vont grimper. Le cours de l'or a récemment chuté, conséquence d'un comportement suiviste qui a donné lieu à un système de Ponzi naturel. Les cours avaient fortement augmenté de 2009 à 2011 parce que les investisseurs pensaient que l'injection de liquidités par les banques centrales pour contrer la crise financière se traduirait par la poursuite de la hausse de l'or ; cela avait incité certains à écouler des espèces contre de l'or quand la valeur des premières baissait. Un flot de fonds a déferlé pour profiter de la hausse attendue de ce marché. Le cours de l'once d'or fin est passé de 900 à 1 800 dollars environ sur ces deux années. En avril 2013, une correction mineure a créé la panique. En se précipitant pour vendre leur métal précieux, les détenteurs d'or ont déclenché un effondrement : en deux jours, les cours ont perdu davantage qu'en 30 ans, déconcertant spéculateurs et analystes.

De la même façon que des chaînes de Ponzi [illegible] sans orchestration, il est possible de fabriquer des bulles et leurs krachs, tout en les faisant passer pour naturels. L'un des plus célèbres épisodes de l'histoire de la finance remonte au début du XVIII[e] siècle, quand la *Compagnie du Mississippi* de John Law, en France, a commencé à rémunérer les investisseurs de façon excessive par rapport aux profits des entreprises implantées dans la colonie de Louisiane. L'escroquerie a attiré de plus en plus d'investisseurs, jusqu'à ce qu'une ruée sur une banque affiliée à la *Compagnie du Mississippi* fasse éclater la tromperie au grand jour.

Certaines opérations financières qui, de l'extérieur, ne ressemblent pas à des pyramides de Ponzi en sont des versions camouflées. Elles sont parfaitement légales, et elles se produisent souvent quand des entreprises manipulent leurs opérations pour rester à flot en période difficile. Un système de Ponzi camouflé est un défi pour les régulateurs, parce qu'il accompagne des activités parfaitement légitimes. En appliquant sans ménagement la règlementation pour les extirper, on risque d'endommager les tissus voisins sains, mais en ne les contrôlant pas, on risque de voir cette excroissance maligne prendre de l'ampleur. De plus, ces pyramides camouflées peuvent prendre des formes diverses.

Certaines opérations financières qui, de l'extérieur, ne ressemblent pas à des pyramides de Ponzi, en sont des versions camouflées.

© Pour la Science - n° 444 - Octobre 2014

On en a un exemple avec les entreprises et les gouvernements qui s'autorisent, de temps en temps, à jongler avec les prêts, une pratique qui n'est pas nocive en elle-même. Parfois, une entreprise ne souhaite pas liquider une portion d'un actif, ce qui peut entraîner des coûts importants, pour rembourser le prêteur. L'emprunteur (que ce soit un particulier, une entreprise, ou un État) va alors se livrer à une sorte d'acrobatie : emprunter à un second prêteur pour rembourser le premier. Si, ce faisant, la capacité à rembourser un emprunt diminue, ou bien si un rendement élevé ne se matérialise pas, ces événements peuvent précipiter un krach.

La crise de la dette du Pérou, au début des années 1980, où le gouvernement a contracté de nouveaux emprunts pour en rembourser d'autres plus anciens, est considérée comme une forme de jonglage avec les prêts. Le gouvernement tablait sur une amélioration de la situation économique qui lui permettrait de rembourser les intérêts et le capital dus, amélioration qui ne s'est jamais matérialisée. Ces espoirs ont été anéantis par un gros tremblement de terre, suivi d'une baisse des exportations de pommes de terre et de sucre, et d'une crise de la dette générale en Amérique latine, avec pour résultat une chute du produit national brut.

Des systèmes de Ponzi camouflés

De nombreuses formes d'activité commerciale légitime peuvent également camoufler un système de Ponzi. Prenons par exemple la pratique très répandue et parfaitement légale qui consiste à donner aux employés des options sur titres (les fameuses *stock options*). Cela peut générer des profits même si l'entreprise ne crée que des produits de valeur insignifiante.

Un parfait exemple serait celui d'une jeune pousse (ou *start-up*) de la Silicon Valley qui embauche des diplômés très qualifiés en leur offrant un faible salaire initial, inférieur à leur valeur sur le marché, mais en y ajoutant des options sur titres promettant une importante rémunération à venir. Les salaires dérisoires garantissent que l'entreprise peut faire des bénéfices même si elle propose ses produits à prix réduit. Le propriétaire, cependant, conserve une partie de la différence entre les marchandises à prix réduits et les salaires encore plus réduits, tout en distribuant le reste comme revenu supplémentaire à certains employés ayant de l'ancienneté.

À mesure que l'entreprise croît et recrute de nouveaux salariés, l'entrepreneur peut faire un très gros profit, même si, comme tous les systèmes de Ponzi, celui-ci finira par faire faillite et laisser les employés sans travail, ou en possession d'options d'achat de titres sans valeur.

L'exemple simplifié suivant illustre comment cela fonctionne, et en quoi cela revêt les attributs d'un système de Ponzi. Une jeune pousse offre à chacun de ses employés un bas salaire, inférieur à la valeur monétaire de ce que produit chacun. Ainsi, pour chaque employé, l'entreprise génère un bénéfice.

Si, en dépit du salaire bas, certains souhaitent travailler pour cette entreprise, c'est en raison de l'attrait des options sur titres distribuées. Supposons qu'au premier trimestre d'activité, l'entreprise emploie un salarié et lui offre des options équivalentes à la moitié de tous les bénéfices pour cette période. Au trimestre suivant, l'entreprise double sa main-d'œuvre en recrutant un nouveau salarié, et offre à ce dernier des options pour un total d'un quart des bénéfices de cette période. Au cours de la troisième période d'activité, la société double à nouveau son personnel en embauchant deux nouveaux employés, et fournit un montant d'options égal au huitième des bénéfices pour cette période, ce qui signifie que chaque nouveau salarié reçoit un seizième de tous les bénéfices. Et ainsi de suite à chaque nouveau trimestre.

Ce plan garantit que les bénéfices de l'entreprise doublent tous les trimestres. Comme les employés reçoivent une part fixe des profits, les gains de leurs options doublent également à chaque période. Et le revenu de l'entrepreneur provient de la différence de valeur entre ce que produisent les employés et les bas salaires, puisque l'entrepreneur conserve une partie de cette différence tout en donnant le reste aux employés sous forme de rémunération de leurs options sur titres.

La croissance exponentielle de la valeur des options sur titres attire ainsi des personnes hautement qualifiées qui, sinon, n'auraient pas choisi un emploi au salaire aussi bas. Mais à terme, un tel système de Ponzi camouflé finit par s'effondrer et par conduire l'entreprise à la faillite : pour gérer durablement ainsi une entreprise, il faut une croissance continue de la main-d'œuvre (et du revenu de la production), ce qui est impossible dans une population finie.

Un exemple de système de Ponzi camouflé qui s'est mal terminé est celui de la firme pétrolière brésilienne OGX, dirigée par l'ancien milliardaire Eike Batista. L'expansion d'OGX a été spectaculaire, et sa chute tout autant. Quand elle s'est

Carlo Ponzi (1882-1949)

Carlo Pietro Giovanni Guglielmo Tebaldo naît le 3 mars 1882 à Lugo, en Italie. Après quelques années infructueuses à l'Université de Rome, qu'il considère comme des « congés payés », il émigre aux États-Unis, atterrissant à Boston à la fin de 1903.

Son absence de scrupules et sa grande intelligence ne tardent pas à se manifester : la première quand il se retrouve en prison au Canada pour avoir imité une signature, et la seconde quand il écrit de prison à sa chère mère, expliquant sa nouvelle adresse par sa nomination à l'excellent poste d'« assistant du directeur » de ladite prison.

De retour à Boston à sa libération, Ponzi met au point une série d'ingénieux stratagèmes financiers pour escroquer des clients appartenant à la classe moyenne. L'effondrement d'un de ses grands montages ruine de nombreuses familles et met à genoux six banques de Boston.

Après plusieurs nouveaux séjours en prison, il finit par être expulsé vers l'Italie, d'où il émigre vers le Brésil. Moralement brisé, en mauvaise santé et presque aveugle, il meurt dans la misère le 18 janvier 1949 à Rio de Janeiro.

– K. B.

Getty Images

Voler Harsha pour payer Gobar

La nouvelle *Rnam Krttva* (« En s'endettant s'il le faut ») de Shibram Chakraborty, un écrivain bengalais du milieu du XX^e siècle, décrit le fondement du système de Ponzi. Le narrateur raconte comment un mercredi matin, il a absolument besoin de 500 roupies, il a une idée.

Prenant son courage à deux mains, il rend visite à son naïf camarade de classe Harshabardhan, et le persuade de lui donner cet argent en lui promettant de le lui rendre le samedi. Quand arrive samedi, il est bien sûr à nouveau dans l'embarras. Heureusement, il se rappelle qu'il a un autre ami d'enfance naïf, Gobardhan ; il réussit à le flatter et à recevoir un prêt de 500 roupies, avec la promesse que la somme lui sera restituée mercredi. Il rend les 500 roupies à Harshabardhan, mais le mercredi il doit rembourser Gobardhan, et il va donc à nouveau rendre visite à Harsha. Rappelant à Harsha qu'il tient ses promesses, il lui emprunte 500 roupies et rembourse Gobar. Et ce manège

La vie continue pour le narrateur, du samedi au mercredi et du mercredi au samedi. Mais un jour, il prédit la catastrophe : il voit Gobar et Harsha, venant de deux rues différentes, se diriger vers lui en même temps. Il est pris de vertige, mais se ressaisit juste à temps pour leur exprimer à quel point il est heureux de rencontrer ses deux meilleurs amis ensemble. Au détour de la conversation, il leur annonce qu'il a un plan qui, les assure-t-il, ne changera en rien leur vie, mais simplifiera beaucoup la sienne. « Tous les mercredis, dit-il à Harsha, aie l'amabilité de donner 500 roupies à Gobar, et tous les samedis, dit-il en se tournant vers Gobar, donne 500 roupies à Harsha. Et rappelez-vous qu'il ne faut jamais vous arrêter ! » Et tandis que ses amis perplexes essaient de comprendre de quoi il est question, la narrateur les salue et prend congé.

– K. B.

effondrée en octobre 2013, ce fut la plus grosse défaillance d'entreprise de l'histoire de l'Amérique latine. L'une des stratégies utilisées par OGX consistait à débaucher les employés talentueux d'autres compagnies en leur offrant de très généreuses options sur titres. Cette distribution d'options sur titres s'est poursuivie pendant un moment, la dette s'accumulant comme une pyramide inversée. Puis la compagnie a implosé, laissant employés et investisseurs sans le sou.

La encore, le défi en terme de régulation vient d'une ressemblance de Ponzi camouflé peut changer de nature en route et rendre à terme l'entreprise complètement légitime. Avec un bon climat économique et un peu de chance, une compagnie qui se livre à de telles pratiques peut finir par innover et créer des produits de plus grande valeur, ce qui permet alors de recruter de nouveaux salariés sans leur faire miroiter des options sur titres. Elle peut dans ce cas ralentir son expansion et devenir viable, sans avoir besoin de continuer à croître et à distribuer des options sur titres.

C'est cela qui rend la réglementation si difficile. S'ils sont trop zélés, les régulateurs peuvent tuer des entreprises légitimes et refroidir les ardeurs de ceux qui voudraient en créer d'autres. Mais à l'opposé, un manque de surveillance peut laisser prospérer des pyramides de Ponzi et des escroqueries susceptibles d'entraîner d'importants dommages.

Dès que l'on cherche à mettre au point un ensemble de règles de contrôle, on est confronté à un énorme défi : l'existence d'activités qui mêlent finances régulières et frauduleuses. Si quelqu'un escroque un investisseur en prétendant que l'argent est placé de façon rentable, et qu'en fait les gains d'aujourd'hui ne correspondent qu'aux pertes inévitables des investisseurs futurs, l'escroc risque d'être traîné en justice. Mais comme avec les autres chaînes de Ponzi, il est possible d'exercer ce type d'activité au grand jour et d'attirer quand même l'argent de victimes manquant de discernement.

Le problème découle aussi en partie de l'irrationalité humaine. Il est très révélateur qu'il ait fallu à l'orthodoxie économique toute une sous-discipline (l'économie comportementale) et un grand nombre d'expériences de laboratoire pour reconnaître que, bien souvent, les humains ne se comportent pas de façon rationnelle.

Grâce à l'accumulation de données et d'analyses au fil des ans, de nombreuses lois visent maintenant à empêcher le développement d'escroqueries à la Ponzi qui ciblent des personnes naïves et sans méfiance. Aux États-Unis, la commission SEC (*Securities and Exchange Commission*, chargée de la réglementation et du contrôle des marchés financiers) a pour mission de clôturer les chaînes de Ponzi frauduleuses. Des lois de plus en plus complexes, telle la loi Dodd-Frank adoptée par le Congrès en 2010, ont pour objectif de s'attaquer à la multitude de formes que peuvent revêtir ces pyramides. La multiplication des pyramides de type Ponzi a également conduit à des discus-

■ BIBLIOGRAPHIE

K. Basu, **A marketing scheme for making money off innocent people : A user's manual**, *Economic Letters*, vol. 107(2), pp. 122-124, 2010.

J.-P. Delahaye, **Escroquerie ou jeu risqué ?**, *Pour la Science*, n° 385, novembre 2009.

M. Artzrouni, **The mathematics of Ponzi schemes**, *Mathematical Social Sciences*, vol. 58(2), pp. 190-201, 2009.

G. A. Akerlof et R. J. Shiller, **Animal Spirits : How Human Psychology Drives the Global Economy, and Why It Matters for Global Capitalism**, Princeton University Press, 2009.

M. Zuckoff, **Ponzi's Scheme : The True Story of a Financial Legend**, Random House, 2005.

© Pour la Science - n° 444 - Octobre 2014

sions récentes en Inde pour amender une loi de 1992 (*Securities and Exchange Board of India*) afin de la rendre plus efficace pour contrôler [illegible].

Une difficulté majeure de la régulation des systèmes de Ponzi légaux ou non vient des particularités des politiques gouvernementales. De nombreux gouvernements, particulièrement dans les économies industrielles, se font une obligation d'intervenir pour secourir les très grosses corporations lorsqu'elles sont sur le point de faire faillite.

Trop gros pour faire faillite

Cette pratique du *too big to fail* (trop gros pour faire faillite) peut attirer vers une firme qui couvre un système de Ponzi des investisseurs confiants dans le fait qu'une fois que l'entreprise sera suffisamment grosse, le gouvernement interviendra avec l'argent des contribuables au moment de l'effondrement, protégeant ainsi les investisseurs, au moins en partie.

La logique du « trop gros pour faire faillite » repose sur l'idée que si une grosse société d'investissement fait faillite, les déposants [illegible] naires seront tellement importants que le gouvernement est obligé de sauver la société. Mais il est aujourd'hui évident qu'une telle politique, bien intentionnée (ou mal intentionnée, mais habilement maquillée), peut exacerber une crise en garantissant aux gros bonnets de la finance que s'ils font un profit, ils se le garderont, et que s'ils subissent une perte, ce sera aux contribuables de payer. Cela a clairement joué un rôle dans la récente crise financière mondiale.

Cette situation conduit à une prise de risque inconsidérée et à des entreprises financières irresponsables. Il est clair que ce dont nous avons besoin, c'est une politique qui puisse, dans des circonstances particulières, impliquer une intervention du gouvernement pour sauver une entreprise privée, mais qui ne sauve pas les personnes qui dirigent cette entreprise et prennent les décisions. Ayant réalisé cela, de nombreuses nations tentent de mettre en place des bonnes pratiques, en érigeant des protections autour des entreprises financières et en les compartimentant afin de garantir que l'argent des contribuables n'aura pas été dépensé pour empêcher la faillite de grosses corporations.

Parmi les autres idées nouvelles que nous devons aux récentes escroqueries et crises financières figure la proposition d'un système de prescription pour les produits financiers. Comme dans le cas d'un médecin qui prescrit une ordonnance pour un médicament dangereux, ce système exigerait qu'un professionnel de la finance ait déclaré sans risque pour le client un nouveau produit financier, par exemple un emprunt-logement complexe, avant que celui-ci signe quoi que ce soit.

Cependant, même si l'on adopte de telles mesures, les systèmes de type Ponzi et les bulles spéculatives resteront des produits dérivés toxiques dans toutes les économies nationales. Chaque nouvelle réglementation sera contournée par un produit financier encore plus ingénieusement monté, qui n'aura d'autre but que de détrousser subtilement les gens de leur argent, produit auquel les régulateurs devront trouver encore une autre riposte… ■

La sélection de livres de POUR LA SCIENCE

Pour la rentrée, partez à la découverte de l'apprentissage de l'enfant, jouez avec la physique et les mathématiques, explorez notre univers… et bien d'autres surprises encore !

Nouveauté

Apprendre à résister

Olivier Houdé

Réf. 74650[illegible]*

Après Piaget, Olivier Houdé a élaboré une théorie révolutionnaire pour décrire l'apprentissage, notamment chez l'enfant. À l'aide de l'apport conjugué de la psychologie et des neurosciences, il a isolé une fonction essentielle du cerveau : la résistance cognitive ! Olivier Houdé nous explique la genèse de cette découverte au travers de nombreux exemples chez les bébés, les enfants et les adolescents. Et nous montre comment on peut la mettre en œuvre pour améliorer l'apprentissage, à tout âge

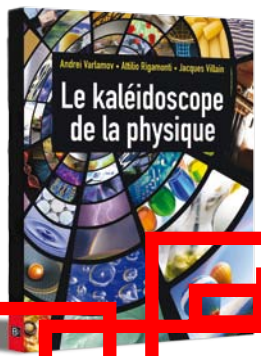
Éditions Le Pommier - 2014 - 96 pages - 10 € - ISBN 978-2-7465-0774-6

Nouveauté

Le kaléidoscope de la physique

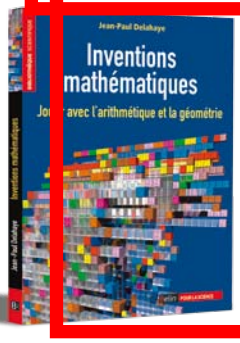
Jacques Villain, Andrei Varlamov et Attilio Rigamonti

Réf. 70116487



Pourquoi les cours d'eau dessinent-ils des méandres ? Comment faire chanter un verre à pied ? Pourrait-on installer un porte-voix entre Paris et Marseille ? Quelles lois régissent la forme des gouttes et des bulles ? Que se passe-t-il lors de la cuisson d'un rôti ? Est-il possible de déguster un plat de pâtes al dente en haut de l'Everest ? Et d'y boire un bon café ? Toutes ces questions, et bien d'autres, trouvent leur réponse dans ce livre.

Éditions Belin 2014 - 240 pages - 27 € - ISBN 978-2-7011-6487-8



Inventions mathématiques

Jouer avec l'arithmétique et la géométrie

Jean-Paul Delahaye

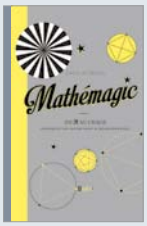
Réf. 84245128

Dans ce livre, vous trouverez des jeux classiques, comme le Tangram et le cube de Rubik, des problèmes du quotidien comme le découpage d'une pizza ou l'accrochage d'un tableau, des énigmes élémentaires ou à l'inverse délicates à propos des nombres premiers et des suites d'entiers, des images grises où la cryptographie cache des visages d'animaux et bien d'autres inventions mathématiques !

Éditions Pour la Science 2014 - 192 pages - 25 € - ISBN 978-2-842[illegible]-8-8

Mathémagic !

David Acheson



Réf. 701176[illegible]6

De pi au pendule chaotique, de Pythagore à Andrew Wiles, embarquez pour une fascinante balade au pays des mathématiques ! De savoureuses illustrations achèveront de convaincre le profane comme l'initié qu'il s'agit là d'un des livres les plus réjouissants jamais écrits sur le sujet.

Éditions Belin 2013 - 176 pages - 15 €
ISBN 978-2-7011-7686-4

La Terre

25 expériences pour découvrir notre planète

André Prost

Réf. 7011[illegible]965

Comment naissent les dunes ? Comment une rivière creuse-t-elle une vallée ? Comment se produit un glissement de terrain ? Etc. Voici 25 expériences ludiques et faciles à réaliser pour comprendre comment le vent, la pluie, la glace… modèlent le visage de la Terre. Avec ce livre, le lecteur goûtera l'excitation du « labo » tout en s'initiant à la démarche scientifique.

Éditions Belin 2014 - 128 pages – 18 €
ISBN 978-2-7011-8965-9

Faire léviter de l'eau

Et autres expériences ébouriffantes

Florian Briant

Réf. 70[illegible]7535

Comment provoquer une tempête dans une bouteille ? Sauriez-vous allumer une ampoule sans la brancher, souffler une bulle géante ou bien extraire votre propre ADN ? Découvrez le plaisir de faire de la science à travers 20 expériences ludiques et réalisables avec du matériel simple.

Éditions Belin 2013 - 176 pages - 21 €
ISBN 978[illegible]

En partenariat avec les éditeurs

Belin ÉDITEUR INDÉPENDANT DEPUIS 1777 — Éditions Le Pommier

Pour commander ces ouvrages www.pourlascience.fr/librairie *

ou en renvoyant le bon de commande ci-contre.

* Pour commander les titres édités par *Le Pommier* : www.editions-belin.fr

Le monde des teintures naturelles (nouvelle édition)

Dominique Cardon

Réf. 70116143

Invitation à un tour du monde des savoirs sur la teinture par les colorants naturels à travers l'histoire de l'art, l'artisanat traditionnel, les recherches scientifiques interdisciplinaires et leurs applications industrielles, cet ouvrage offre une synthèse des connaissances sur les matières colorantes présentes dans plus de quatre cents plantes, lichens et champignons et dans une quarantaine d'animaux du monde entier !

Éditions Belin 2014 - 800 pages - 59 €
ISBN 978-2-7011-6143-3

Ce que disent les étoiles

Danielle Briot et Noël Robichon

Réf. 70116285

Qu'est-ce qu'une étoile et par quel mécanisme brille-t-elle ? Comment naît une étoile, comment meurt-elle ? Qu'est-ce qu'un pulsar, une naine brune, une supernova ? Ce livre, signé de deux astronomes de l'Observatoire de Paris, propose un vaste panorama de l'astrophysique des étoiles en une trentaine de sujets, abondamment illustrés de photographies époustouflantes.

Éditions Belin 2013 - 160 pages - 25 €
ISBN 978-2-7011-6285-0

Nouveauté

Du labo à l'école

Elena Pasquinelli

Réf. 74650682*

Mieux savoir ce qui se passe dans la tête des enfants quand ils font de la science permet de réfléchir à pourquoi enseigner la science aux enfants, et à comment le faire, dès le plus jeune âge. Ce livre tente d'expliquer les difficultés des élèves dans l'apprentissage des sciences et réfléchit à la manière de les dépasser, en favorisant une meilleure compréhension des contenus et de la nature de la science.

Éditions Le Pommier 2014
456 pages - 27 € - ISBN 978-2-7465-0682-4

L'exploration des planètes

Thérèse Encrenaz et James Lequeux

Réf. 70116195

En retraçant la conquête pacifique du [illegible]ire, ce livre met à la portée d'un large public les démarches et les résultats des générations d'astronomes qui se sont succédé depuis Galilée. Il ouvre sur une nouvelle dimension de la planétologie avec la découverte récente de près d'un millier d'exoplanètes… où peut-être d'autres formes de vie seront détectées ?

Éditions Belin 2014 - 224 pages - 23 €
ISBN 978-2-7011-6195-2

La libido déficiente de la licorne

Et autres histoires de science et d'animaux

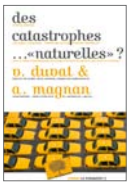
Sébastien Thorin

Réf. 74650762*

Et si la disparition des licornes était due à leur corne ? Et les rayures du zèbre tout bêtement destinées à camoufler sa tendance à l'obésité ? Faut-il vraiment consommer du steak de kangourou pour sauver la planète ? Une mine d'informations insolites, cocasses – et parfois totalement inventées ! – sur de nombreuses espèces animales… dont la nôtre !

Éditions Le Pommier 2014

À LIRE AUSSI



Des catastrophes… « naturelles ? »

Virginie Duvat et Alexandre Magnan

Réf. 74650679*

Éditions Le Pommier 2013
312 pages - 23 € - ISBN 978-2-7465-0679-4

Répondre du vivant

Roland Schaer

Réf. 74650667*

Éditions Le Pommier 2013
240 pages - 21 €
ISBN 978-2-7465-0667-1

Destination Géométrie et topologie avec Thurston

Aurélien Alvarez (dir.)

Réf. 74650708*

Éditions Le Pommier 2014
160 pages - 19 € - ISBN 978-2-7465-0708-1

Destination Systèmes dynamiques avec Poincaré

Aurélien Alvarez (dir.)

Éditions Le Pommier 2014
160 pages - 19 € - ISBN 978-2-7465-0707-4

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)	+	€
		€

J'indique mes coordonnées :

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

*pour recevoir la newsletter *Pour la Science* (à remplir en majuscules).

Je choisis mon mode de règlement :

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

Signature obligatoire

POUR LA SCIENCE · Belin ÉDITEUR INDÉPENDANT DEPUIS 1777 · Le Pommier

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

DPL443 Offre valable jusqu'au [illegible] dans la limite des stocks disponibles.

HISTOIRE DES SCIENCES

Houtermans, physicien entre Hitler et Staline

Friedrich Houtermans est un pionnier de la physique nucléaire injustement oublié. Ses travaux sont d'autant plus remarquables qu'il les a réalisés en survivant de justesse à l'oppression nazie et stalinienne.

Dieter HOFFMANN

Tant de grands physiciens ont vécu au XXe siècle qu'il n'est pas étonnant que certains soient passés inaperçus. Friedrich Georg Houtermans (1903-1966), ou plus brièvement Fritz Houtermans, est l'un d'eux. Ce fils d'un banquier de Danzig (aujourd'hui Gdansk en Pologne) et d'une Viennoise issue d'une famille aisée, détentrice par ailleurs de l'un des premiers doctorats féminins autrichiens, avait tout contre lui dans les années 1930 et 1940 : il était à la fois juif et communiste. Sans l'action de sa femme et des grands physiciens d'Europe, il aurait disparu dans un camp stalinien ou nazi. Mais il a survécu et poursuivi envers et contre tout une carrière de physicien si prolifique qu'elle fait de lui l'un des pionniers de la physique moderne.

Au début des années 1920, Houtermans intègre l'école libre de Wickersdorf en Thuringe pour terminer ses études secondaires. Les principes laïques et démocratiques de cette école privée conviennent sans doute mieux à ce jeune homme original que le lycée autrichien, qui vient de le renvoyer car il a récité en public le Manifeste du parti communiste.

Il part ensuite étudier la physique à Göttingen. Dans les années 1920, cette petite ville universitaire de Basse-Saxe est à la pointe mondiale de la recherche en physique et en mathématique. Son directeur de thèse, James Franck, par ses recherches sur les chocs atomiques, contribue à la validation du modèle de Bohr (selon lequel l'atome d'hydrogène est constitué d'un noyau autour duquel un électron est en orbite sur l'un parmi plusieurs niveaux d'énergie possibles) et plus généralement de la théorie quantique. Il lance son étudiant dans l'étude de la fluorescence de l'atome de mercure. Houtermans montre que la stimulation de cette émission lumineuse suppose une onde excitatrice d'une fréquence légèrement supérieure à celle correspondant à la différence entre niveaux d'énergie de l'atome.

Un Autrichien heureux de vivre et passionné

Après l'obtention de son doctorat en 1927, Houtermans reste un an à Göttingen pour travailler avec George Gamow, un boursier russe venu de Léningrad (aujourd'hui Saint-Pétersbourg). Les deux jeunes chercheurs publient ensemble une théorie de la désintégration alpha, une forme de radioactivité. Dans son autobiographie, le physicien russe décrira son collègue de l'époque comme un Autrichien heureux de vivre et passionné par les questions théoriques. La théorie de Gamow-Houtermans issue de cette collaboration repose sur l'idée que la particule alpha parvient à quitter le noyau grâce à l'effet tunnel, notion que le physicien russe venait de développer.

Cette collaboration achevée à l'automne 1928, Houtermans quitte Göttingen pour devenir l'assistant de Gustav Hertz à l'Université technique de Berlin. En 1933, il obtient son habilitation à diriger des recherches après un travail sur les déplacements de niveaux hyperfins (sous-niveaux électroniques dus à l'influence magnétique du noyau) qu'entraîne la petite différence de masse séparant deux isotopes.

Dans le même temps, il collabore avec l'astrophysicien anglais Robert d'Escourt-Atkinson, venu lui aussi de Göttingen. Les deux chercheurs travaillent sur l'idée que deux protons assez rapides (donc énergétiques) peuvent [illegible] électrostatique grâce à l'effet tunnel et fusionner en un noyau de deutérium (H_2), réaction exothermique qui expliquerait la production d'énergie dans les étoiles. Comme ni Houtermans ni d'Escourt-Atkinson ne sont des théoriciens, ils invitent Gamow au ski pour discuter de cette réaction de fusion et établir son bilan énergétique. Dix ans plus tard, Carl Friedrich von Weizsäcker en Allemagne et Hans Bethe aux États-Unis, se référeront à ce travail pionnier lorsqu'ils proposeront un modèle de la production d'énergie dans les étoiles de type solaire.

À Berlin, Houtermans fait aussi œuvre de pionnier dans les recherches à l'origine du microscope électronique. À l'Université technique, Max Knoll et son étudiant Ernst Ruska travaillent à construire des lentilles

Toutes les figures sont de l'auteur.

© Pour la Science - n° 444 - Octobre 2014

électrostatiques afin de former des images de microscopie à l'aide de faisceaux d'électrons focalisés. Houtermans attire leur attention sur le fait que dans un tel dispositif, la résolution est déterminée par la « longueur d'onde de de Broglie » de l'électron.

En 1930, au cours d'un voyage en Union Soviétique, Houtermans épouse Charlotte Riefenstahl, qui avait passé son doctorat dans le même institut que lui et la même année. À Berlin, le couple est vite connu pour son hospitalité : les soirées arrosées, [illegible] Gamow, Wolfgang Pauli et tant d'autres, se succèdent sous son toit. On discute sur- [illegible] ou encore de musique. L'appartement est aussi le lieu de conspirations, puisque Houtermans, communiste depuis sa jeunesse, informe l'« appareil de surveillance des entreprises », un organe du parti communiste allemand collaborant étroitement avec le renseignement militaire soviétique. Le rôle de Houtermans est mal connu, mais une mention cryptique dans un document du parti datant de 1935 suggère qu'il accomplit pour le compte de l'Union soviétique des missions d'espionnage industriel à la satisfaction de ses commanditaires directs.

Le 30 janvier 1933, le parti nazi monte au pouvoir, et la persécution des Juifs et de tous ceux qui n'adhèrent pas à ses idées commence. Houtermans ne peut qu'être en danger. À l'Université, des groupes nazis l'agressent physiquement. La milice nazie perquisitionne sa maison, mais sans trouver de preuve de ses opinions communistes. Comme il est juif, il ne tarde pas à être licencié par l'Université dans le cadre de la loi nazie dite de « restauration de la fonction publique ».

[illegible] qui compte désormais une fille nommée Giovanna, fuit l'Allemagne. Après des détours par Paris et Copenhague, elle arrive en Angleterre, où le physicien russe Piotr Kapitza procure à Houtermans un emploi dans la société d'électronique *EMI* à Haynes. Son rôle au sein de l'équipe de développement des téléviseurs ne le comblant pas, Houtermans entreprend de vérifier expérimentalement l'existence de l'émission stimulée de lumière par les atomes, un phénomène supposé par Einstein dès 1916, mais non encore vérifié. Faute d'équipement adéquat, il doit interrompre ses essais, mais il est peut-être passé tout près de la découverte de l'émission laser...

Dans le même temps, Houtermans s'engage fortement pour assister tous ceux qui fuient le régime nazi, aidant les chercheurs allemands émigrés à trouver un emploi. Le fait qu'il fasse la connaissance d'Alexander Leipunski, physicien nucléaire venu de Kharkov en Ukraine pour travailler à l'Institut d'Ernest Rutherford à Cambridge entre 1933 et 1934, suggère que ses contacts avec les services secrets soviétiques persistent.

Émigration vers l'URSS

En dépit des avertissements de sa mère et de collègues qui connaissaient les conditions de vie soviétiques, la famille Houtermans émigre en URSS au printemps 1935. Ce n'est pas un voyage en terre inconnue, non seulement parce que Houtermans se sent proche politiquement de l'Union soviétique, mais aussi parce qu'il y a une perspective professionnelle. Dans le cadre de son vaste programme de modernisation et d'industrialisation, l'Union soviétique cherche en effet à compenser son manque de personnel qualifié en recrutant des scientifiques, des ingénieurs et des spécialistes industriels

1. FRITZ HOUTERMANS lors de ses recherches doctorales sur l'émission stimulée dans la fluorescence du mercure *(à gauche)* ou avec des amis physiciens à Göttingen *(à droite au premier plan, lesquels George Gamow (2e à gauche)*.

occidentaux. Parmi eux, nombre de physiciens, dont des Allemands, vont travailler à l'Institut physico-technique d'Ukraine (UFTI) à Kharkov.

Fondé en 1929, l'UFTI est vite devenu l'un des plus grands et des plus performants organismes de recherche d'Union soviétique, notamment en physique des basses températures et en physique nucléaire. Du reste, à l'UFTI se trouve alors Igor Kourtchatov, qui dirigera le développement de l'arme nucléaire soviétique. Les recherches qu'y mènent notamment Leipunski, le théoricien Lev Landau ou le spécialiste des basses températures Lev Schubnikow transforment Kharkov en un centre intellectuel pour les physiciens occidentaux. Cela est d'autant plus vrai qu'avec la crise de 1929 et la prise de pouvoir des nazis, les perspectives professionnelles d'un chercheur européen ne sont pas roses ! Lorsque, au début de 1935, la famille Houtermans arrive à Kharkov, elle y trouve une petite colonie d'émigrés, comptant notamment des physiciens et l'écrivain Arthur Koestler.

D'espion fasciste à espion soviétique

Houtermans prend la direction d'un laboratoire dans le département de physique nucléaire de Leipunski. Au cours des deux années de son activité à l'UFTI, il étudie avant tout le comportement des neutrons thermiques (ou neutrons lents) jusqu'à ce que, fin 1937, ses fonctions prennent brutalement fin. La terreur stalinienne a commencé et nombre des connaissances des Houtermans subissent des arrestations arbitraires suivies de procès fictifs.

Fritz et Charlotte Houtermans tentent de quitter le pays au plus vite. Ils se rendent à Moscou accomplir les formalités obligatoires de sortie du territoire, mais alors qu'ils essaient de passer la frontière, Fritz est arrêté et transféré à la Loubianka, siège du NKVD, la police politique de l'Union soviétique.

Une semaine après l'arrestation de son mari, Charlotte parvient à quitter l'Union soviétique avec ses deux enfants (Jan est né à Kharkov en 1935) en passant par la Baltique. À Copenhague, elle lance aussitôt une action internationale de solidarité en faveur de son mari et d'autres physiciens emprisonnés par le NKVD. Outre Niels Bohr, Wolfgang Pauli, Frédéric et Irène Joliot-Curie et Albert Einstein y participent. Ces éminents scientifiques demandent à Staline et à d'autres hommes politiques soviétiques de bien vouloir les informer sur le sort de Fritz Houtermans. Pendant ce temps, Charlotte, qui a travaillé aux États-Unis dix ans plus tôt, y retourne enseigner la physique, trouvant ainsi les moyens d'élever ses enfants en sécurité.

Les lettres envoyées à Staline restent sans réponse, mais se révèlent efficaces. Au contraire de la plupart des millions de victimes de la terreur stalinienne, Fritz Houtermans ne disparaît pas sans laisser de traces. Après moult tortures et interrogatoires, il sera sauvé par le volet secret du pacte germano-soviétique prévoyant la livraison mutuelle des réfugiés, c'est-à-dire qu'il sera livré à la… Gestapo.

Pour l'interroger sur son activité en Union soviétique, celle-ci l'enferme et le torture sans doute aussi. Deux raisons expliquent que Houtermans ne se retrouve pas en camp de concentration : d'une part, le soutien des physiciens de premier ordre tel Max von Laue continue ; d'autre part, les nazis s'intéressent à ses compétences de physicien nucléaire. En effet, depuis l'été 1939, la *Wehrmacht* (l'armée allemande) a lancé un projet pour étudier l'utilisation militaire de la fission de l'uranium. On le désignera par le terme *Uranprojekt* (projet uranium) parce que l'ensemble des physiciens qui y participaient étaient appelés l'*Uranverein*, c'est-à-dire le « Club de l'uranium ».

Le 16 juillet 1940, Houtermans est libéré après qu'il aurait avoué à la Gestapo avoir accepté sous menace de mort d'espionner pour le NKVD avant son départ d'Union soviétique. Devenu pendant quelques mois rédacteur de rapports sur la physique soviétique, il obtient un poste au laboratoire privé de l'inventeur Manfred von Ardenne situé à Berlin-Lichterfelde. Longtemps après, celui-ci vantera encore les « idées inventives et géniales qui ont fait de Houtermans l'un des piliers de l'équipe de Lichterfelde ».

Le groupe de von Ardenne recherche entre autres des matières fissiles plus

L'AUTEUR

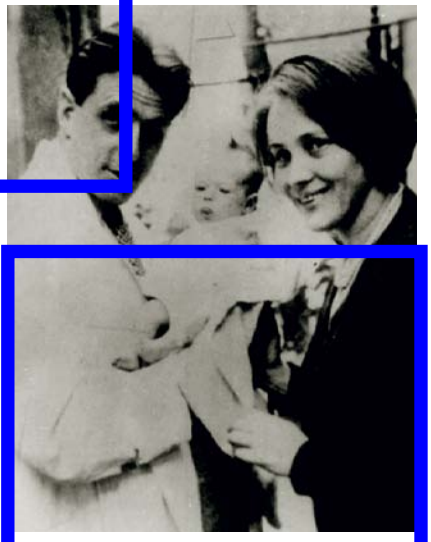
Dieter HOFFMANN, historien des sciences, est membre de l'Institut Max Planck d'histoire des sciences et professeur à l'Université Humboldt à Berlin.

BIBLIOGRAPHIE

E. Amaldi, **The Adventurous Life of Friedrich Georg Houtermans, Physicist (1903-1966)**, Springer, 2013.

V. J. Frenkel, **Professor Friedrich [illegible] Schicksal. Biographie eines Physikers des zwanzigsten Jahrhunderts**, D. Hoffmann (dir.), Preprint 414, Institut Max-Planck pour l'histoire des sciences, Berlin, 2011.

M. Walter, **German National Socialism and the Quest for Nuclear Power**, Cambridge, 1993.



2. FRITZ ET CHARLOTTE HOUTERMANS
avec leur fille Giovanna, née à Berlin un an après leur mariage en 1931.

© Pour la Science - n° 444 - Octobre 2014

faciles à obtenir que l'uranium 235. En août 1941, Houtermans rédige un rapport proposant de produire un élément transuranien de numéro atomique 94, qui serait plus facile à séparer que les isotopes de l'uranium et qui lui semble susceptible de servir comme « explosif atomique ». Son idée est exactement la même que celle de von Weizsäcker, l'un des principaux physiciens du *Uranprojekt*, qui dépose à ce propos un brevet de bombe. Cette idée d'un explosif transuranien est en fait celle que mettent en œuvre les physiciens du projet *Manhattan* aux États-Unis. Du reste, le plutonium, car il s'agit de lui, est aujourd'hui encore l'explosif nucléaire de la plupart des bombes atomiques.

Houtermans est conscient de l'importance de ses travaux pour le *Uranprojekt*. Considérant qu'une bombe atomique entre les mains des nazis serait fatale, il profite en 1941 de la fuite de son collègue juif Fritz Reiche vers les États-Unis pour faire passer un message oral aux physiciens travaillant à la bombe en Amérique. Il leur dit en substance : « Pressez-vous, nous y sommes presque ! » Il n'est pas certain que le message ait beaucoup influencé le projet *Manhattan*, mais il atteste en tout cas de l'énorme courage de Houtermans, qui, si sa démarche avait été découverte, aurait été condamné à mort.

Houtermans et la bombe

Même si les nazis le considèrent comme un traître, ils forcent Houtermans à prendre la direction de l'UFTI après la conquête de Kharkov en octobre 1941. Sa mission consiste à évaluer la physique nucléaire soviétique et à recruter sur place des physiciens pour le *Uranprojekt*. Sous sa direction, aucun physicien soviétique ne sera déporté, et ni le très convoité générateur de Van de Graaf de Kharkov ni d'autres installations de l'UFTI ne seront démontés et transportés en Allemagne.

Malgré cela, cet épisode transforme Houtermans en nazi et en traître aux yeux des physiciens soviétiques, et la réputation qu'ils lui font après la guerre, notamment Kapitza qui l'avait aidé en Angleterre,

3. EN DÉCEMBRE 1937, Fritz Houtermans, qui fuyait le régime nazi et avait trouvé une nouvelle patrie en Ukraine, est arrêté par le NKVD, la police politique soviétique. Accusé d'être un « agent fasciste », il est torturé. L'inscription en cyrillique se lit *2766. Houtermans Fritz Ottowitsch* [illegible] est transféré à la police politique nazie, la Gestapo.

porte sérieusement atteinte à son image, particulièrement auprès des physiciens anglo-saxons.

Après cette mission contestée, Houtermans entre à la PTR (*Physikalisch-Technische Reichsanstalt*), l'organisme métrologique allemand. Dans le cadre du *Uranprojekt*, il y travaille sur la physique des neutrons. À partir de l'automne 1943, il œuvre à Ronneburg en Thuringe, où le service d'étude de la radioactivité a été installé en raison des bombardements incessants sur Berlin. C'est à cette époque, que, divorcé de Charlotte par l'effet d'une loi spéciale sur les séparations dues à la guerre, il fait la connaissance de sa collègue chimiste Ilse Bartz, qu'il épouse et avec qui il aura trois enfants.

Intervient alors un épisode caractéristique de l'humour de Houtermans. Comme ce grand fumeur souffre du rationnement des cigarettes, il lui vient l'idée de réclamer du tabac en vue d'y procéder à la « détermination du taux d'eau lourde » (oxyde de deutérium) dans le cadre de « recherches importantes pour la guerre ». Il envoie à cet effet une lettre à en-tête de la PTR à une usine de cigarettes de Dresde et obtient en effet une grande quantité de poudre de tabac. Toutefois, lorsqu'il en réclame plus en prétendant avoir obtenu de « bons résultats », sa nouvelle lettre atterrit sur le bureau du directeur de la PTR, qui le licencie avec effet le 1er janvier 1945. Dans cette phase critique de la guerre, cela implique qu'il peut se retrouver au front ou en prison…

Une fois de plus, le soutien de physiciens de premier ordre – Werner Heisenberg et Walter Gerlach – le sauve en le faisant nommer pour « recherches importantes pour la guerre » à l'Université de Göttingen. Là, Houtermans est censé faire avancer la séparation isotopique, mais la fin de la guerre interrompt aussitôt ses recherches.

Après que les troupes anglaises ont investi Göttingen en avril 1945, une unité spéciale américaine vient enquêter sur *Uranprojekt*. Houtermans est interrogé, mais ce qu'il raconte convainc ses interlocuteurs que ses recherches sont peu importantes. Il n'est pas déporté à Farm Hall en Angleterre, où les Anglais enferment et espionnent tout un groupe de physiciens allemands, dans l'espoir de leur soutirer des informations utiles au projet américain de bombe.

À la sortie de la guerre, que pouvait faire Houtermans ? Après avoir été pourchassé par les nazis en tant que juif et communiste, il a été successivement considéré comme un « espion fasciste », un « espion du NKVD », et un nazi.

C'est une fois de plus avec l'aide de Heisenberg qu'une nouvelle perspective professionnelle se dessine pour lui. Le physicien le fait venir pour travailler sous sa direction sur la physique expérimentale des neutrons et sur divers problèmes de physique fondamentale au sein de ce qui va devenir l'Institut Max Planck. Collaborant alors avec le théoricien Pascual Jordan, Houtermans étudie l'évolution temporelle de la désintégration radioactive bêta. Avec Hans Jensen, il publie aussi un article intitulé « De la dissociation thermique du vide ». Dans le même temps, il travaille à livrer son témoignage historique. Il publie anonymement en 1951 *Die russische Säuberung* (La purge russe), livre coécrit avec l'historien ukrainien Konstantin Schteppa, lui aussi un survivant de la purge stalinienne.

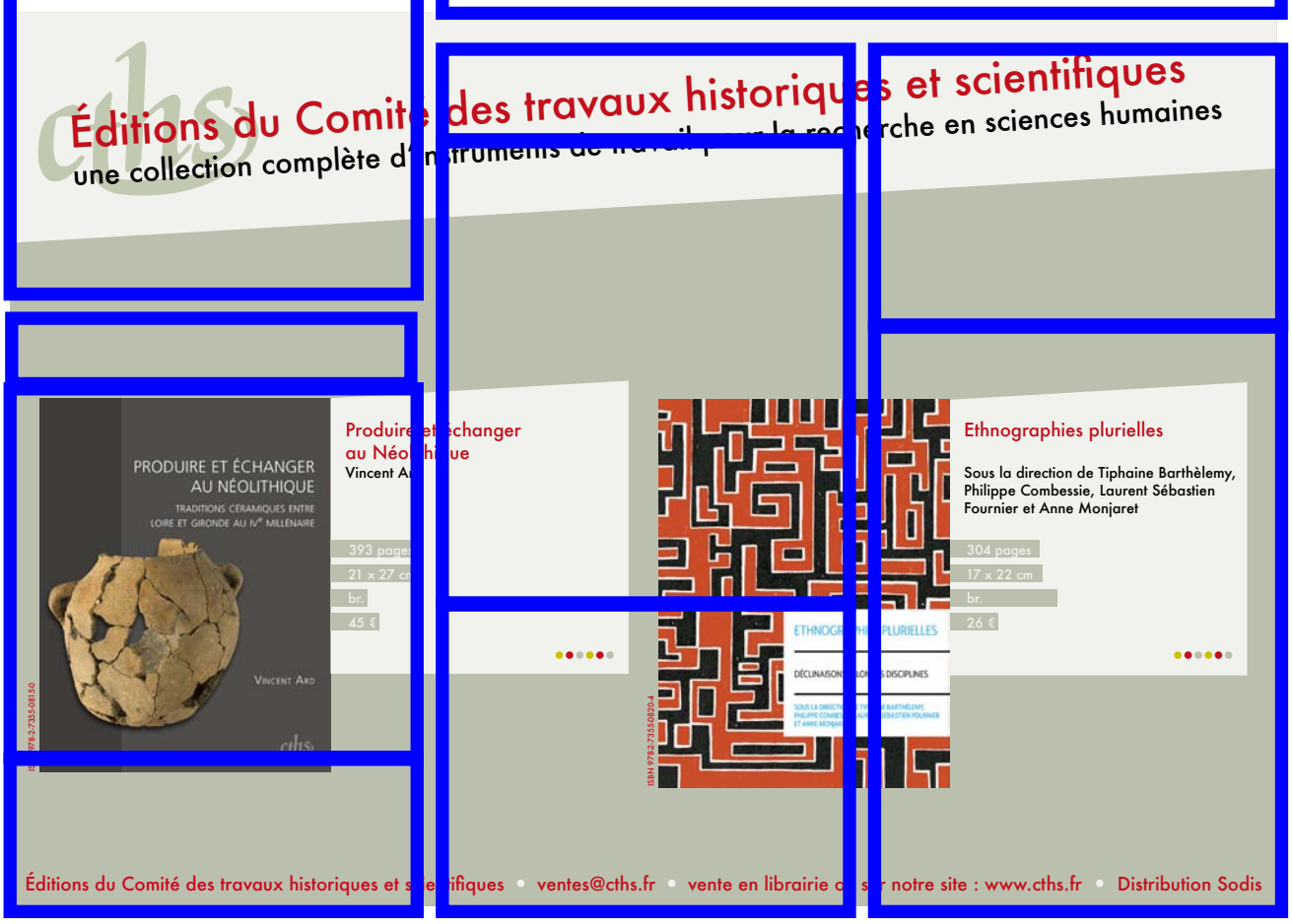
En 1951, après avoir revu Giovanna, Jan et leur mère Charlotte, il décide de divorcer de Ilse. En 1952, il entame une quatrième carrière fructueuse quand l'Université de Berne, en Suisse, lui offre une chaire de professeur. Ce tournant s'accompagne de son remariage avec Charlotte en 1953, union renouvelée qui, cependant, ne durera que quelques mois. En 1955, il épouse en quatrième noce Lore Müller – la belle-sœur de son demi-frère Hans.

À Berne, Houtermans prend la direction de l'Institut de physique et le modernise profondément. Les nombreux travaux de physique nucléaire qu'il y lance vont de [illegible] protection, concernent des questions de physique des particules élémentaires et de chimie cosmique ou portent sur la mise au point de la radiochronologie. C'est particulièrement dans ce dernier domaine, inauguré par Rutherford au début du XX^{e} siècle, qu'une fois de plus, Houtermans fait œuvre de pionnier.

L'âge de la Terre

Ainsi, il interprète avec ses équipes les variations des isotopes uranium-plomb dans les météorites et élabore une détermination de l'âge de la Terre. Il trouve 4,5 milliards d'années, valeur très proche de l'estimation actuelle (4,57 milliards d'années). Il lance aussi l'utilisation de la thermoluminescence dans la détermination de l'âge des minéraux.

Le 1er mars 1966 à Berne, Houtermans [illegible] un cratère lunaire porte son nom. ■



© Pour la Science - n° 444 - Octobre 2014

Pour la rentrée faites le plein de nouvelles expériences

BULLETIN D'ABONNEMENT

POUR LA SCIENCE

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

❑ **Oui, je m'abonne à *Pour la Science* (12 nos/an) + *Dossier Pour la Science* (4 nos/an)**

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

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

❑ **2 ans • 32 numéros • 142 €** au lieu de ~~190,40 €~~

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

+ En cadeau, je choisis 1 numéro *Dossier Pour la Science* parmi les titres suivants :

❑ N° 71 - M0770671
Avril - Juin 2011

❑ N° 72 - M0770672
Juill. - Sept. 2011

❑ N° 73 - M0770673
Oct. - Déc. 2011

❑ N° 74 - M0770674
Janv. - Mars 2012

❑ N° 75 - M0770675
Avril - Juin 2012

❑ N° 76 - M0770676
Juill. - Sept. 2012

❑ N° 77 - M0770677
Oct. - Déc. 2012

❑ N° 78 - M0770678
Janv. - Mars 2013

Retrouvez tous les numéros parus sur www.pourlascience.fr

J'indique mes coordonnées :

Nom : _____

Prénom _____

Adresse _____

_____

CP: _____ Ville : _____

Pays : _____ Tél. (facultatif) : _____

Je choisis mon mode de règlement :

❑ Par chèque à l'ordre de *Pour la Science*

❑ Par carte bancaire

Numéro de carte _____

Date d'expiration _____ Signature obligatoire

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

_____@_____

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

PLS444 • Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31.10.2014

LOGIQUE & CALCUL

Cosmos : l'art de spéculer sérieusement

Certains événements astrophysiques majeurs tels que la naissance de trous noirs ou les mouvements de certaines étoiles pourraient-ils être contrôlés par des intelligences supérieures ?

Jean-Paul DELAHAYE

Notre imagination est bien timorée lorsque nous tentons de concevoir le futur ou la structure globale de l'Univers. La science-fiction nous aide un peu, mais elle oublie souvent les contraintes de la physique ou de la logique. La méthode la plus intéressante pour aborder ces « grandes questions » est finalement celle qui s'autorise toute hypothèse, mais en prenant en compte au mieux ce que nous apprend la science et ce qu'elle considère comme possible.

De nombreux scientifiques se sont adonnés à ce jeu de la spéculation savante – Nikolaï Kardashev, Freeman Dyson, Carl Sagan, Lee Smolin, Roger Penrose, etc. –, et il en est résulté une assez volumineuse littérature, parfois technique, mais sidérante et enivrante à bien des égards. Ces explorations et extrapolations font hurler certains esprits peu enclins à la fantaisie, mais il y voient bien de pertinent et s'emportent si l'on prétend que de tels exercices sont une forme légitime de recherche scientifique. Si c'est votre sensibilité, passez votre chemin, car le livre que nous analyserons conduit aux confins de la physique, du raisonnement et peut-être même du raisonnable.

Clément Vidal est philosophe des sciences et chercheur à la *Vrije Universiteit* de Bruxelles. Il vient de publier un livre dont le titre est tout un programme : *The Beginning and the End : The Meaning of Life in a Cosmological Perspective* (Le commencement et la fin : le sens de la vie dans une perspective cosmologique). Connaissant et maîtrisant la littérature sur les questions de l'origine, du devenir ultime de l'Univers et les conceptions générales du monde formulées par la cosmologie et les philosophes, il présente un panorama organisé des réponses envisageables aux grandes questions que l'humanité se pose depuis toujours. Bien sûr, ces grandes questions ont été abordées par les religions, mais ici l'approche est non dogmatique et consiste comme il se doit à échanger des arguments rationnels et contradictoires.

Une partie importante du livre de C. Vidal sur laquelle nous allons nous concentrer traite d'un problème précis : les lois de la physique condamnent-elles irrémédiablement la vie à disparaître ?

La seconde loi de la thermodynamique, selon laquelle l'entropie de tout système fermé augmente inéluctablement, a pour conséquence que tout dans l'Univers finira par s'égaliser thermiquement dans ce qu'il est convenu d'appeler la « mort thermique », état stabilisé et uniforme qui, bien évidemment, interdit toute persistance d'êtres vivants et donc d'êtres humains que nous fassions, nous disparaîtrons, semble-t-il, affirmer la thermodynamique.

Bien que discutée – faut-il considérer l'Univers comme un système fermé ? –, cette fin programmée de l'humanité, que l'on retrouve sous la forme de la mort thermique ou sous d'autres formes dans la plupart des modèles cosmologiques, ne doit-elle pas nous inquiéter ?

À titre de provocation sans doute, C. Vidal explique que nous ne pouvons pas être indifférents à cela. De la même façon que pour les conséquences du réchauffement climatique ou du déséquilibre des comptes des caisses de retraite, pour C. Vidal ne pas se sentir préoccupé de ce qu'il adviendra de l'humanité et de la vie, même dans un avenir très lointain, est une forme d'immoralité.

Civilisations avancées?

Là où son attitude diffère de celle la plus souvent affichée, c'est quand il annonce que la question n'est peut-être pas indépendante de notre volonté. Son avis se fonde sur la prise en considération de l'échelle de Nikolaï Kardashev complétée par celle de John Barrow. Il s'agit de deux méthodes pour classer les civilisations technologiques futures (ou présentes, mais non encore découvertes) en fonction de leur état d'avancement.

Dans un article publié en 1964, l'astronome soviétique N. Kardashev a classé en trois niveaux les civilisations technologiques, en se fondant sur la quantité d'énergie qu'elles maîtrisent. Les civilisations de type I sur cette échelle contrôlent et utilisent toute l'énergie produite par leur planète ; nous n'y

© Pour la Science - n° 444 - Octobre 2014

sommes pas encore ! Les civilisations de type II accèdent à la totalité de l'énergie d'une étoile telle que notre soleil. Les civilisations de type III disposent et se servent de la totalité de l'énergie contenue dans une galaxie. Nous en sommes très loin !

En 1998, John Barrow, cosmologiste et astrophysicien à l'Université de Cambridge, a proposé une autre classification indépendante et complémentaire, fondée sur la taille des objets qu'une technologie donnée est en mesure de contrôler.

Il y a sept niveaux. Au niveau I, une civilisation maîtrise les objets de la taille de ses individus : habitations, véhicules, etc. Nous y sommes. Le niveau II correspond à une maîtrise des [illegible] individus – organes, cellules, gènes – qu'on devient capable de transplanter, remplacer, sélectionner et manipuler. Nous y arrivons. Le niveau III imagine une capacité d'action moléculaire permettant de connaître ou de créer des matériaux de toutes sortes en associant des molécules. Nous avons franchi quelques pas dans cette direction. Le niveau IV est celui du passage à l'échelle atomique : la science, devenue maîtresse des nanotechnologies, conçoit et construit des objets artificiels minuscules, atome par atome, et crée par exemple des formes artificielles de vie. Nous y pensons !

Le niveau V atteint le noyau des atomes et ses composants, qui deviennent manipulables. Le niveau VI domine les particules les plus élémentaires de la matière – quarks et leptons – permettant la création de nouveaux assemblages complexes. Nous en sommes loin. Le dernier niveau, Oméga, correspond à une domination totale de toutes les structures de base de l'espace et du temps. Nous ne savons même pas imaginer clairement ce que cela signifie.

Dans le parcours de ces deux échelles, envisageons diverses étapes. Nous en considérerons trois étudiées et décrites dans le livre de C. Vidal : les classiques sphères de Dyson ; les hypothétiques civilisations « stellivores », peut-être observables dès maintenant ; les très spéculatives civilisations créatrices d'univers et sujettes à des mécanismes de sélection darwinienne à l'échelle du cosmos.

1. La mort thermique de l'Univers

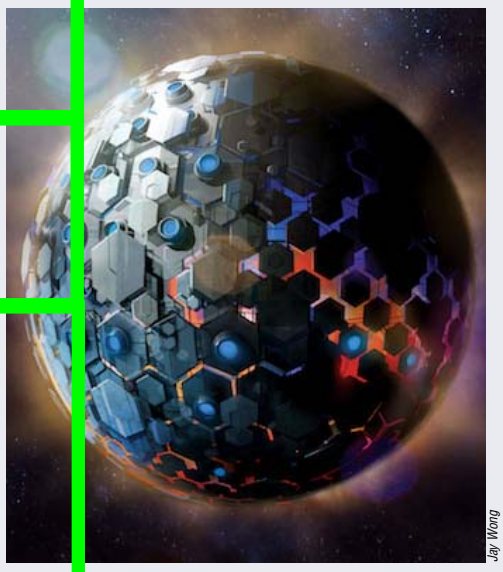
© vorze, shutterstock.com

La seconde loi de la thermodynamique affirmant la croissance continue de l'entropie de l'Univers, considéré comme un système isolé, implique que l'Univers va vers un état où toute l'énergie sera uniformément distribuée et où toute vie sera impossible, un état nommé « mort thermique ». L'idée a été proposée en 1851 par Lord Kelvin qui s'appuyait sur les travaux de Sadi Carnot, James Joule et Rudolf Clau- [illegible] gés depuis par les cosmologistes sont plus variés, mais la plupart prévoient qu'au-delà d'un certain moment l'Univers ne pourra plus héberger la vie.

En 2000, Lawrence Krauss et Glenn Starkman expliquaient dans un article : « Les données actuelles suggèrent que la constante cosmologique est non nulle, ce qui revient au même, que nous vivons dans un univers ouvert [...]. Si l'univers reste déterminé par cette constante, notre capacité à [illegible] structures de grandes tailles diminuera à mesure que le temps s'écoulera. Les objets observables disparaîtront sur une durée de l'ordre de grandeur de la vie d'une étoile. De plus [...], la durée de vie de toute civilisation ne pourra qu'être finie [...]. À moins d'un improbable et très puissant effet gravitationnel, la totalité de l'information manipulable par une civilisation durant la totalité de l'histoire de l'Univers sera finie, et donc si nous admettons que la conscience et l'esprit sont fondés sur une forme de calcul physique, la vie ne peut pas être éternelle. »

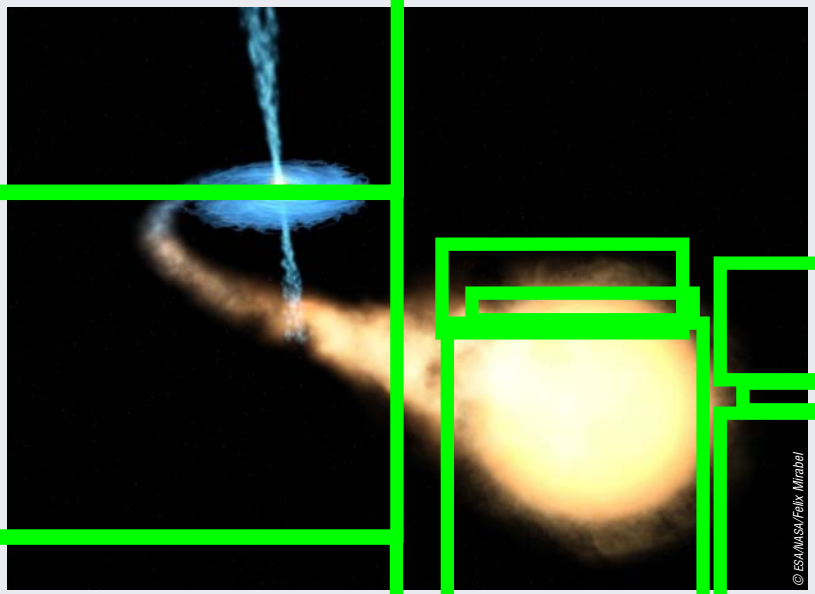
2. Les sphères de Dyson

Les sphères de Dyson ont été imaginées comme un moyen pour une civilisation de profiter de toute l'énergie de rayonnement d'une étoile. Pour cela, de telles structures entourent un soleil. L'idée d'une coque immense est séduisante, mais, comme l'a précisé Freeman Dyson, elle est mécaniquement impossible : la gravitation de l'étoile conduirait à l'effondrement de la structure. Il faut plutôt imaginer une multitude d'objets en orbite autour de l'étoile, si nombreux que tout rayonnement qui s'en échappe est intercepté et capté par l'un des objets en orbite.



Jay Wong

3. Les étoiles doubles starivores



© ESA/NASA/Felix Mirabel

Il existe trois sortes de systèmes d'étoiles doubles. Les deux corps peuvent être en contact, totalement détachés ou semi-détachés, c'est-à-dire échangeant de la matière. Cette troisième catégorie, d'après Clément Vidal, est particulièrement intéressante : « Dans les systèmes semi-détachés, on observe un flux énergétique qui pourrait être contrôlé. Des arguments thermodynamiques permettent une interprétation métabolique de ces systèmes binaires. La justesse de telles interprétations n'est pas tranchée, mais on peut envisager des tests à partir des données astrophysiques disponibles. »

Une sphère de Dyson est une structure envisagée en 1960 par le célèbre physicien américain Freeman Dyson, dans un article de la revue *Science*. Il s'inspirait d'un roman de science-fiction publié en 1937 par Olaf Stapleton et intitulé *Star Maker*. Il n'a jamais prétendu être l'inventeur de l'idée, quoiqu'elle porte son nom aujourd'hui.

Capturer toute l'énergie d'une étoile ?

Le but de ces structures est de capturer l'essentiel de l'énergie du rayonnement d'une étoile. L'idée d'une coque sphérique creuse entourant l'étoile, retenue assez souvent dans les livres de science-fiction, est bien sûr la plus naturelle. Cependant, comme le précise F. Dyson lui-même, elle est physiquement impossible : la force d'attraction de l'étoile la ferait s'effondrer. Sans donner beaucoup de précisions, F. Dyson pense plutôt à une collection d'un grand nombre d'objets en orbite autour de l'étoile concernée, dont la totalité cache l'étoile et en capte toutes les émissions, ou au moins une partie importante.

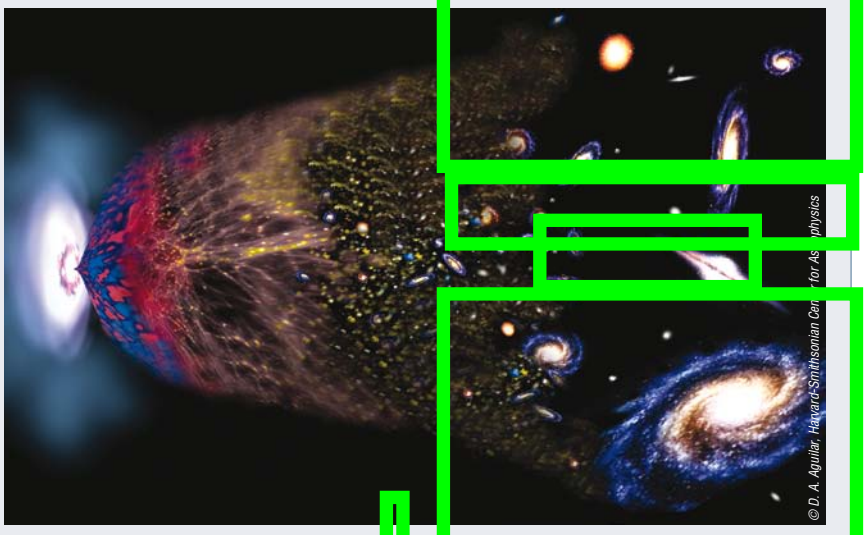
Une civilisation réussissant la construction d'un tel ensemble serait une civilisation de type II sur l'échelle de N. Kardashev. Le spectre émis par une telle sphère, absorbant l'essentiel du rayonnement de l'étoile enveloppée, serait nécessairement très différent des spectres connus des étoiles nues. On serait donc en mesure de les détecter de très loin. Pour F. Dyson, les émissions infrarouges de ces hypothétiques sphères méritaient d'être recherchées pour détecter d'autres civilisations éventuelles. L'idée a été suivie plusieurs fois. En particulier, des recherches menées par le Fermilab, aux États-Unis, explorant 250 000 sources d'émission, ont conduit en 2009 à repérer 17 sources infrarouges compatibles avec ce qu'on imagine que produirait une sphère de Dyson. Mais aucune n'a encore été confirmée comme provenant d'une civilisation extraterrestre.

Capter l'énergie émise par une étoile, sans en laisser s'échapper trop, c'est très bien, mais la matière d'une étoile est aussi de l'énergie. Aussi, on imagine qu'une civi-

© Pour la Science - n° 444 - Octobre 2014

4. La sélection naturelle de Lee Smolin

L'idée de la sélection naturelle a été reprise dans diverses sciences. Par exemple, les [illegible] moyen de concevoir des programmes efficaces en simulant un processus de sélection entre programmes candidats. En cosmologie, l'idée a été proposée par Lee Smolin qui imagine que les trous noirs se formant dans un univers comme le nôtre sont dans certains cas assimilables à des naissances d'univers. Les univers les plus susceptibles de donner naissance à d'autres trous noirs sont favorisés et ont donc une descendance plus nombreuse. Par conséquent, on ne doit pas être étonné d'être présent dans un univers où les trous noirs se forment aisément. Une sorte de sélection naturelle se déroulerait donc à un niveau cosmique.



© D. A. Aguilar, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics

lisation avancée de niveau V sur l'échelle de J. Barrow, maîtrisant les états très denses de la matière, souhaiterait s'en emparer rapidement sans avoir à attendre les milliards d'années nécessaires pour que l'émission naturelle de l'étoile la rende disponible. Peut-on concevoir d'autres moyens d'utiliser rapidement et efficacement l'énergie d'une étoile et qu'adopterait une civilisation avancée ? C'est une idée que C. Vidal étudie en détail.

Aspirer la matière de l'astre

L'observation de certains systèmes astronomiques doubles, en particulier impliquant un trou noir et une autre étoile, suggère d'intéressantes questions sur ce thème. L'étoile y est aspirée par un mécanisme d[illegible] comme s'il était piloté. L'ensemble permet d[illegible] céder à une part importante de l'énergie de l'étoile sans attendre qu'elle s'en libère par émission spontanée. Par ailleurs, certains systèmes doubles émettent des jets de matière et de rayonnement comme s'ils évacuaient une sorte de déchet. La forme optimale de consommation de l'énergie d'une étoile ne ressemblerait-elle pas à cela ? La matière serait utilisée petit à petit, et ce qui est expulsé correspondrait à l'évacuation de l'entropie. C Vidal insiste sur l'analogie thermodynamique entre un tel système et le métabolisme des êtres vivants que nous connaissons.

Bien sûr, pour arriver à de telles formes, la vie hypothétique constituant ces systèmes doubles serait très différente de celle sur Terre, fondée sur la chimie du carbone. F. Dyson lui-même et d'autres ont depuis longtemps suggéré que la vie pourrait exister sous des formes très différentes de la nôtre. Il n'est pas absurde d'imaginer de tels types exotiques de vie, que justement des civilisations avancées sur l'échelle de J. Barrow maîtriseraient et créeraient.

L'existence de ces systèmes vivants fonctionnant sur un rythme temporel [illegible] à une température plus élevée et en utilisant une matière plus dense que celle de la Terre, est bien évidemment une spéculation. Elle mérite d'être précisée, mais pourquoi se l'interdire ? La suggestion de C. Vidal, que certains systèmes binaires observés depuis longtemps par nos télescopes ont des propriétés thermodynamiques évoquant des systèmes vivants pourraient être des civilisations avancées, n'est donc pas plus absurde que les sphères de F. Dyson.

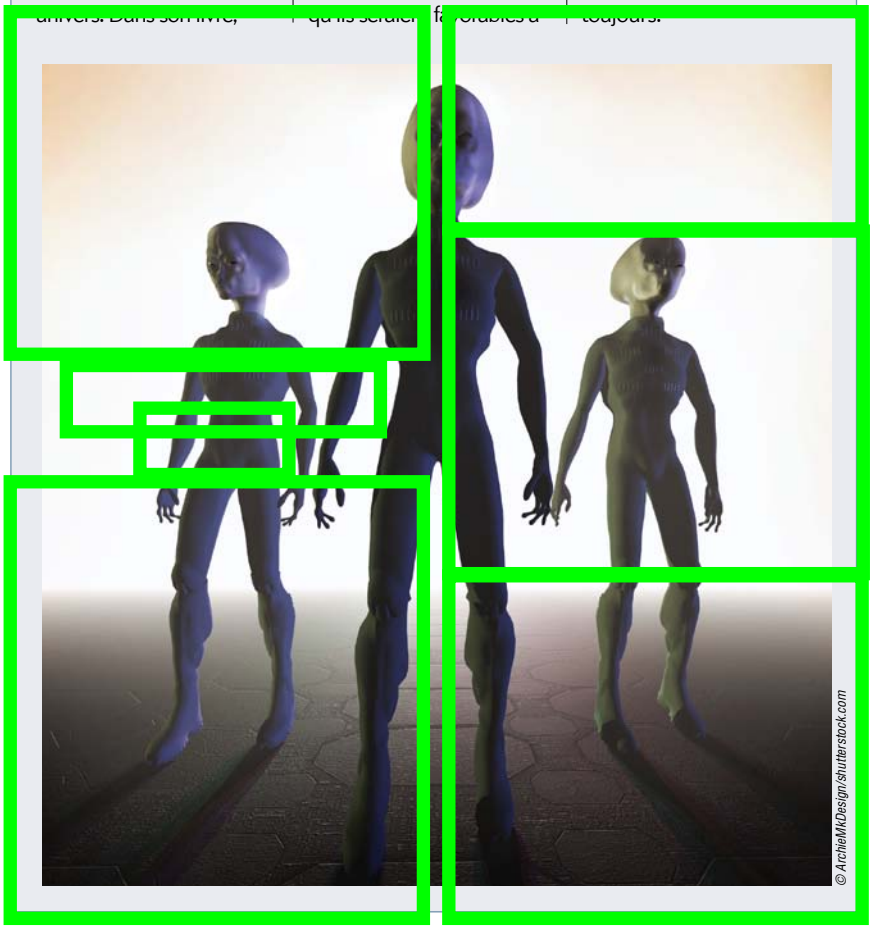
C. Vidal propose de nommer « starivores » ces civilisations qui mangent les étoiles. Un autre indice qu'il avance en faveur de l'idée que nous voyons depuis longtemps ces structures artificielles est fondé sur la grande variété des systèmes doubles connus. Aujourd'hui encore, on découvre des systèmes binaires qui se présentent sous des formes inattendues... comme lorsque nous découvrons de nouveaux êtres vivants sur Terre !

Une caractéristique de tous les êtres vivants est qu'ils manipulent de l'information. Celle-ci est au cœur de leur reproduction (l'information génétique), de leur action sur leur environnement (l'information à l'œuvre dans notre système nerveux, dans l'organisation sociale, et dans la circulation du savoir scientifique). Une preuve définitive de la découverte de civilisations extraterrestres ne sera établie que lorsque nous aurons pu prouver que de tels sustèmes de traitement de l'information sont présents dans les objets célestes que nous soupçonnons être liés à des intelligences différentes de la nôtre. Pour l'instant, nous n'y sommes pas !

5. La sélection artificielle de Clément Vidal

L'idée de Lee Smolin *(voir l'encadré 4)* permet également d'expliquer que les univers où se forment facilement des trous noirs sont plus probables que les autres. Ce qui étonne les cosmologues est plutôt que le jeu des paramètres physiques de notre univers permet à la vie d'y exister, alors que de très petites variations de ces paramètres conduisent à des univers où la vie serait impossible. Cependant, s'il y a un tel ajustement fin favorisant la vie, il faut, pour l'expliquer, imaginer d'autres mécanismes que celui d'une sélection naturelle entre univers. Dans son livre, Clément Vidal évoque une variante de l'idée de L. Smolin : la sélection artificielle d'univers. Les civilisations avancées maîtrisant des quantités d'énergie bien supérieures à celles dont nous avons le contrôle créeraient des trous noirs en disposant d'un certain contrôle de leurs caractéristiques, qu'elles choisiraient favorables à la vie. Cette évolution cosmique sur le long terme serait un moyen indirect d'échapper à la mort qui nous est promise au sein de notre univers, ou au moins permettrait d'engendrer des univers succédant au nôtre qui, parce qu'ils seraient favorables à la vie, pourraient être vus comme nos descendants. La disparition inéluctable à laquelle les lois de notre univers nous vouent serait alors contournée.

Ce type de spéculations déplaît fortement à ceux qui ne souhaitent pas qu'on extrapole le savoir scientifique au-delà ce qui est fermement établi. C. Vidal défend l'idée qu'à condition de mener des raisonnements restants compatible avec les connaissances scientifiques acquises, cette attitude est la meilleure façon d'envisager les grandes questions que l'humanité se pose depuis toujours.


© ArchiMkDesign/shutterstock.com

Parmi les tests envisageables pour établir l'existence de starivores, C. Vidal en a imaginé un assez simple. Une fois l'étoile consommée, une telle civilisation serait amenée à se déplacer vers une nouvelle étoile proche dans le but de l'exploiter. Si nous observions un corps très dense s'éloignant d'un système binaire épuisé ou presque épuisé dans la direction de l'étoile voisine, ne devrions-nous pas en conclure que nous avons affaire à une telle civilisation, qui se dirige vers sa proie ?

Enfants-univers

Une autre idée folle, mais qu'un spéculateur déterminé doit étudier, concerne des civilisations d'un niveau encore supérieur, des civilisations créatrices de nouveaux univers.

La cosmologie envisage que lorsqu'un trou noir se forme, c'est une porte vers un nouvel univers qui pourrait s'ouvrir. La séparation complète entre l'intérieur du trou noir et l'univers où il se forme évoque la création d'une bulle de savon s'échappant d'une surface plane sur laquelle on souffle. La bulle se détache et s'en va, indépendante, coupée de tout contact causal avec la surface dont elle est issue. Ce processus d'engendrement d'un enfant-univers peut bien sûr se poursuivre, et l'enfant-univers donnera naissance à d'autres enfants-univers, et ainsi de suite.

Poussant l'analogie avec le monde vivant, le physicien théoricien américain Lee Smolin a proposé dès 1992 l'idée que ces engendrements pourraient donner lieu à une forme de sélection naturelle. L'idée d'un darwinisme cosmique concernant les trous noirs semble choquante, mais elle se tient, car d'un univers père à ses descendants, il est naturel d'imaginer certaines variations (elles sont nécessaires pour qu'il y ait sélection) : les constantes physiques par exemple ne s'imposent pas logiquement. Depuis longtemps, on a émis l'idée qu'elles pourraient varier avec le temps ou, et c'est ce qui nous intéresse ici, qu'il pourrait exister des univers ayant des constantes fondamentales différentes des nôtres.

Le raisonnement « darwinien », expliquant certaines propriétés de notre univers, est le suivant.

© Pour la Science - n° 444 - Octobre 2014

ainsi la naissance de nouveaux univers est possible, par exemple par la création de trous noirs se détachant complètement de l'univers d'origine,

b) les univers ainsi créés varient légèrement et aléatoirement d'un univers à ses descendants,

c) il en résulte un taux de reproduction différent d'un univers à l'autre, selon ses caractéristiques,

d) donc se trouveront sélectionnés et favorisés les univers ayant les meilleures capacités à créer de nouveaux univers descendants.

e) De ce fait, il n'est pas étonnant que nous observions des valeurs des paramètres fondamentaux de notre univers qui correspondent à un taux important de production de trous noirs.

Ce pouvoir explicatif d'un hypothétique mécanisme de sélection naturelle à l'échelle cosmique ne répond qu'à la question portant sur l'ajustement fin des paramètres de notre physique favorisant la création de trous noirs. C'est intéressant, mais cela ne répond pas à la question bien plus importante de l'ajustement fin des paramètres de notre physique à l'apparition de la vie, et plus généralement de la complexité et de l'intelligence.

Cet ajustement fin, examiné depuis longtemps par les cosmologistes, a donné lieu à des travaux scientifiques et des réflexions philosophiques. C. Vidal livre une discussion assez critique de ce thème qui le conduit à la conclusion que c'est un sujet délicat, logiquement, philosophiquement et donc scientifiquement, qui exige qu'on le traite expérimentalement à l'aide de tests, par exemple en simulant d'autres mondes physiques. Malheureusement, ce type de simulations est aujourd'hui hors de portée. Reste que si, comme de nombreux cosmologistes le défendent, il y a vraiment un ajustement fin des paramètres fondamentaux de l'univers assurant l'apparition de la vie – et pas seulement des trous noirs –, alors la sélection naturelle entre univers (envisagée par L. Smolin) n'en fournit pas de bonne explication. Il faut trouver autre chose.

Une alternative est celle des univers multiples. L'univers global, dont nous ne percevons qu'une infime partie, serait en fait composé d'une multitude d'univers parallèles, la plupart ne donnant pas naissance à des univers aussi développés que le nôtre et peuplés d'êtres vivants comme nous. Nous n'aurions pas à être étonnés de vivre dans un univers spécialement ajusté à la vie, car sinon nous n'existerions pas ! Ce mode de raisonnement controversé, nommé *principe anthropique*, est examiné par C. Vidal, mais comme il se fonde sur l'idée des univers multiples qui est probablement impossible à tester, il ne séduit pas C. Vidal, qui introduit et défend une variante de l'idée de L. Smolin : la sélection artificielle d'univers.

Effet de sélection

Si, comme on l'a déjà envisagé plus haut, il existe (ou existera) des civilisations maîtrisant les composants ultimes de l'univers (donc de niveau III sur l'échelle de Kardashev, et au moins II sur l'échelle de Barrow), pourquoi ne pas imaginer qu'arrivé à un certain stade de développement, une civilisation crée des trous noirs – et donc des univers – dont elle décide les paramètres. Pour lutter contre leur disparition inéluctable (du fait de la mort thermique ou d'une autre sinistre conséquence cosmologique des structures de leur univers), de telles civilisations pourraient souhaiter créer des univers favorables à la vie, et peut-être même plus favorables à la vie que ne l'est leur univers. La sélection darwinienne de L. Smolin, incapable d'expliquer la vie, serait alors remplacée par une forme de sélection artificielle comme celle pratiquée par l'humanité depuis des millénaires et qui a conduit à des espèces végétales et animales adaptées à nos désirs.

Une telle sélection artificielle entre univers n'est pas en mesure d'expliquer complètement l'ajustement fin des paramètres (qui aurait créé le premier univers où la vie a été possible ?), mais constitue, parmi d'autres, une idée qu'il faut prendre en considération pour envisager le futur lointain.

Les exercices intellectuels proposés par le livre de Vidal, sont un sommet inégalé de liberté et de rigueur (autant qu'il est possible), dans un domaine où la science et le rêve semblent s'accorder et dialoguer passionnément. ■

L'AUTEUR

J.-P. DELAHAYE
est professeur émérite à l'Université de Lille et chercheur au Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille (LIFL).

BIBLIOGRAPHIE

C. Vidal, **The Beginning and the End. The Meaning of Life in a Cosmological Perspective**, Springer, 2014.

R. Carrigan, **IRAS-based whole-sky upper limit on Dyson spheres**, *Astrophys. Journal*, vol. 698, pp. 2075-2086, 2009.

J. Barrow *et al.*, **Fitness of the Cosmos for Life**, Cambridge University Press, 2008.

L. Krauss et G. Starkman, **Life, the universe, and nothing : Life and death in an ever-expanding universe**, *Astrophys. Journal*, vol. 531, pp. 22-20, 2000.

J. Barrow, **Impossibility : The Limits of Science and the Science of Limits**, Random House, 1999.

L. Smolin, **The Life of the Cosmos**, Oxford University Press, 1997.

N. S. Kardashev, **Transmission of information by extraterrestrial civilizations**, *Soviet Astronomy*, vol. 8, pp. 217-221, 1964.

F. Dyson, **Search for artificial stellar sources of infrared radiation**, *Science*, vol. 131, pp. 1667-1668, 1960.

Logique & calcul sur
www.pourlascience.fr

SCIENCE & FICTION

Ces mondes glacés qui hébergeraient la vie

Certaines planètes glacées de la science-fiction ressemblent à la Terre il y a des millions d'années, voire à des lunes glacées qui abritent peut-être des formes de vie encore inconnues.

Jean-Sébastien STEYER et Roland LEHOUCQ

À l'heure où l'épisode VII de la saga *Star Wars* est en cours de tournage, revenons sur l'épisode V, *L'Empire contre-attaque* (Kershner et Lucas, 1980). Au début du film, l'alliance rebelle s'est réfugiée sur la planète Hoth située dans la Bordure Extérieure. C'est à la surface glacée de cette planète hostile, sans cesse fouettée par de violents blizzards, que les Rebelles ont construit une base secrète – finalement prise d'assaut par les forces de Dark Vador.

Pour les géologues, la planète Hoth, aussi fictive soit-elle, n'est pas sans rappeler la Terre d'il y a plus de 650 millions d'années. En effet, d'après le célèbre modèle nommé *snowball earth* en anglais (Terre boule de neige, qu'il serait plus juste de remplacer par Terre boule de glace), la Terre aurait subi plusieurs épisodes de glaciation plus ou moins intenses il y a entre 850 et 635 millions d'années, une ère nommée Cryogénien. Si l'idée d'une glaciation globale a d'abord été avancée par le géologue australien – et grand explorateur de l'Antarctique – Douglas Mawson en 1949, le modèle « Terre boule de glace » a été largement développé et argumenté par les géologues américains Joseph Kirschvink et Paul Hoffman dans les années 1990, pour expliquer la présence de roches sédimentaires (les diamictites) d'origine glaciaire, à des latitudes proches de celles de l'équateur.

S'il est assez consensuel, ce modèle est cependant discuté par des géophysiciens qui pensent que la Terre n'aurait pas pu sortir d'une [illegible], ou que la quantité d'eau n'était pas suffisante pour recouvrir toute la surface terrestre d'une couche de glace continue. Les débats se concentrent [illegible] de cette hypothétique croûte de glace.

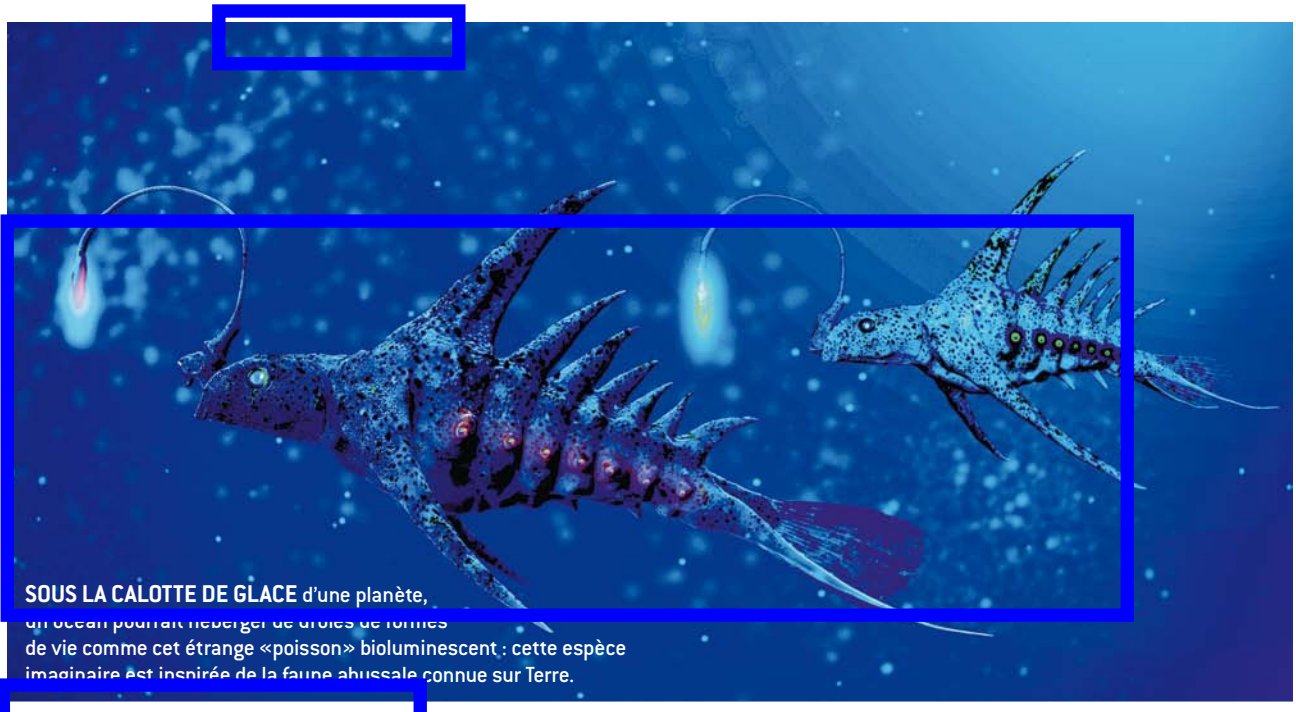
Notons qu'au Cryogénien, les océans terrestres abritent déjà quelques [illegible] et de bactéries, mais aucune vie n'est encore présente sur le supercontinent de l'époque, la Rodinia. Ce n'est pas le cas de la planète Hoth qui, par [illegible] phiques, est peuplée d'animaux plus complexes tels les wampas, sortes de yétis au pelage blanc et dont un spécimen s'attaque au héros Luke Skywalker.

Le film suggère aussi que ces prédateurs carnivores se nourrissent d'autres animaux, les tauntauns, [illegible] tiqués par les Rebelles qui les utilisent comme montures. L'écosystème de Hoth est donc plus complexe que celui de la Terre au Cryogénien. Sur Terre, il faut attendre la fin du Silurien, il y a 420 millions d'années environ, pour voir apparaître les premiers réseaux trophiques [illegible] composés de plantes et d'arthropodes terrestres (mille-pattes, proto-scorpions, etc.), auxquels s'ajoutent les fameux stégocéphales (amphibiens fossiles) au début du Carbonifère, il y a [illegible] millions d'années environ.

Sur Hoth, les wampas mangent les tauntauns, mais que mangent ces derniers ? Probablement [illegible]

© Lucasfilm Ltd. & TM. All Rights Reserved.

1. LE TAUNTAUN est un animal imaginaire qui vit sur la planète Hoth dans la saga *Star Wars*. Grâce à sa fourrure épaisse, il est adapté au froid de la planète.



SOUS LA CALOTTE DE GLACE d'une planète, un océan pourrait héberger de drôles de formes de vie comme cet étrange «poisson» bioluminescent : cette espèce imaginaire est inspirée de la faune abyssale connue sur Terre.

© 2014 Marc Boulay, marcboulay.fr, cassima-productions.com

présence de steppes et donc que la glaciation de Hoth ne serait que partielle. Cette question s'applique aussi à la Terre boule de glace.

Autre remarque sur les tauntauns : ces herbivores ont le sang chaud. En effet, pour éviter que Luke Skywalker ne tombe en hypothermie et ne meurre de froid, Han Solo, alors pris dans un blizzard, sacrifie sa monture et glisse son ami dans la dépouille encore chaude en attendant les secours.

Avec de tels êtres évoquant des mammifères, la faune de Hoth rappelle plutôt celle de la dernière glaciation terrestre (il y a entre 110 000 et 10 000 ans) où des rhinocéros laineux côtoyaient des mammouths, et où des chasseurs-cueilleurs pouvaient joindre à pied l'Eurasie et l'Amérique du Nord grâce à une calotte glaciaire qui recouvrait alors toute une partie de l'hémisphère Nord.

Les animaux de la planète Hoth, avec leur sang chaud et leur fourrure, semblent donc bien adaptés aux températures extrêmes. Ce n'est pas forcément le cas des monstres peuplant d'autres planètes glacées de la science-fiction : ainsi, dans le film *Star Trek* de J. J. Abrams (2009), James Kirk se retrouve sur la très froide planète Delta Vega. Il devient vite la proie d'un énorme prédateur amphibie qui transperce la glace et le pourchasse avec ses longues pattes. On peut se demander comment ce monstre à peau nue est capable de supporter des températures aussi basses, que ce soit dans l'eau ou sur la banquise. Une réponse possible est que l'activité métabolique produit de la chaleur, dégagée dans le volume du corps et évacuée par la surface. Comme le volume augmente avec la taille plus vite que la surface, un animal de grande taille peut avoir une température interne supérieure à l'extérieure. Ce phénomène est envisagé pour certains grands dinosaures et nommé « homéothermie de masse » ; mais il est difficilement compatible avec les longues excroissances mobiles du monstre de Delta Vega.

Un corps glacé bien réel

Le Système solaire contient plusieurs corps glacés, comme Europe, une lune de Jupiter dont la température de surface avoisine –150 °C. Environ quatre fois plus petit que la Terre, ce satellite est entièrement recouvert d'une croûte de glace dont l'épaisseur est estimée à quelques dizaines de kilomètres. Cette calotte glaciaire couvrirait un océan liquide profond d'environ 90 kilomètres. De nombreux indices confirment l'hypothèse d'eau liquide. En surface, la glace striée et craquelée présente de nombreuses lignes, sortes de dépressions rectilignes interprétées comme des fossés d'effondrement. Ces structures témoigneraient d'une « tectonique » glaciaire importante et active, comme c'est le cas de la banquise terrestre qui bouge sur l'océan. Par ailleurs, des geysers d'eau ont été récemment détectés sur Europe. On retrouve une structure similaire sur Encelade, une lune de Saturne.

Comme ces deux satellites sont petits, l'eau n'atteindrait pas une pression suffisante pour devenir solide en profondeur. Le fond de l'océan serait alors en contact avec un manteau silicaté. À cette interface, une chimie complexe pourrait se développer, renforçant l'espoir – loin d'être confirmé – que des formes de vie dites extrêmophiles, comparables à celles que l'on trouve dans les dorsales océaniques terrestres ou dans les lacs subglaciaires d'Antarctique, pourraient apparaître. Pour bon nombre d'exobiologistes, Europe et Encelade sont les meilleurs candidats à la présence de vie dans le Système solaire. Un nouveau programme rassemblant les agences spatiales européenne, américaine, japonaise et russe est envisagé à l'horizon de 2020 pour explorer les lunes glacées de Jupiter. La dernière sonde en date ayant visité Jupiter et ses satellites est *Galileo*, restée en orbite autour de la géante gazeuse entre 1995 et 2003.

Et si les premiers êtres extraterrestres n'étaient pas les Martiens mais les Européens ? La science-fiction s'est, bien sûr, déjà emparée de la question : dans le récent *Europa Report*, film de l'Équatorien Sebastián Cordero (2013), les survivants d'une mission internationale explorant l'océan subglacaire du satellite font une terrible découverte… ■

J.-S. STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. R. LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay.

ART & SCIENCE

Algorithmes psychédéliques

Grâce aux théories d'Alan Turing sur la morphogenèse, l'Australien Jonathan McCabe crée des œuvres spectaculaires qui évoquent, entre autres, des intérieurs de cellules.

Laïc MANGIN

En 1952, Alan Turing publiait un article intitulé *The chemical basis of morphogenesis* (Les Fondements chimiques de la morphogenèse). Il y proposait des mécanismes de formation de motifs et de formes chez les animaux et les plantes à partir d'une simple équation, celle dite de réaction-diffusion. Schématiquement, des substances diffusent dans un milieu et interagissent *via* des réactions d'inhibition et d'activation. Les rayures du tigre, les taches de la girafe, les motifs des coquillages, la disposition des feuilles sur une tige et même la formation des doigts s'expliqueraient par le modèle de Turing.

Les biologistes ne sont pas les seuls à avoir exploité ses vertus. Physiciens et géologues se le sont également approprié, mais aussi les artistes. C'est le cas de Jonathan McCabe, qui vit à Canberra, en Australie. Ses œuvres, qui ressemblent à des coupes tissulaires, à des intérieurs de cellules ou à des motifs iridescents dont sont parés poissons et lézards *(voir la page ci-contre)*, sont forgées à l'aide des équations de Turing.

Cette technique relève de l'art dit génératif. De quoi s'agit-il ? Pour s'en revendiquer, l'artiste doit utiliser un système autonome qui, en dehors de toute intervention humaine, « décide » d'une œuvre ou au moins de certaines de ses composantes. Le système est souvent un algorithme informatique (c'est le cas pour J. McCabe), mais des artistes utilisent des processus biologiques, des contraintes mathématiques, des robots…

Des fugues de Bach, les *Cut-up* de William Burroughs (un texte est découpé et réarrangé), les ouvrages du mouvement Dada et de l'Oulipo sont autant d'exemples d'art génératif.

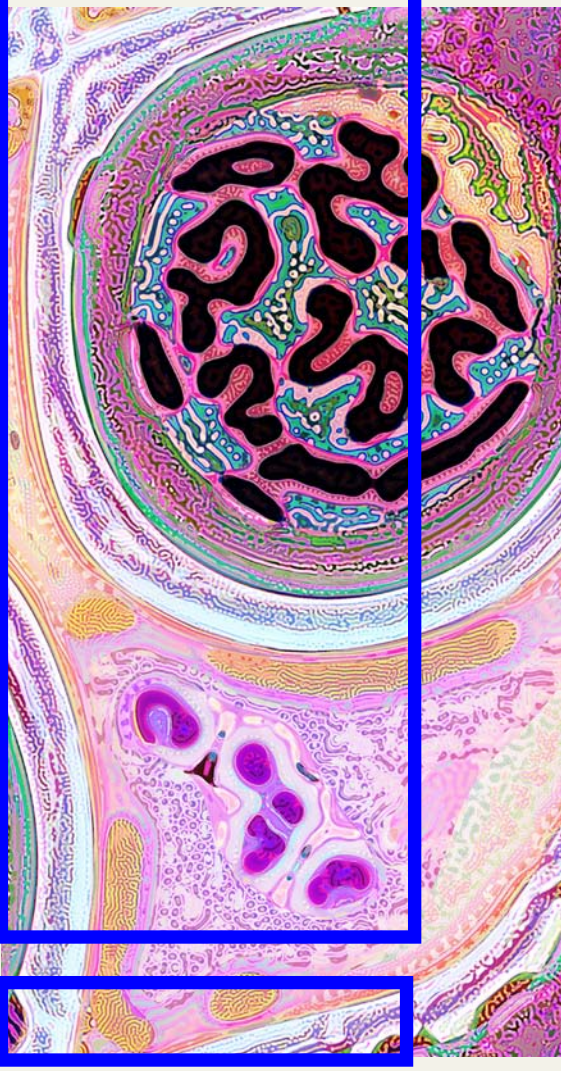
J. McCabe a remplacé les cellules des êtres vivants par des pixels dont la couleur est définie par le programme qu'il a mis au point. De la même façon que les réactions chimiques dans une cellule influent sur celles des voisines, l'état d'un pixel dépend de celui de son environnement.

Les premières œuvres de l'Australien étaient simples, en noir et blanc. Puis, en superposant (virtuellement) les processus de Turing, il a obtenu des motifs complexes, multi-échelles, où de larges bandes constituées de petits points coexistent avec des tourbillons multicolores. Lorsqu'un motif – au départ imprévisible – lui plaît, J. McCabe ajoute parfois un algorithme supplémentaire, dit génétique, pour obtenir des variations sur un même thème. ■

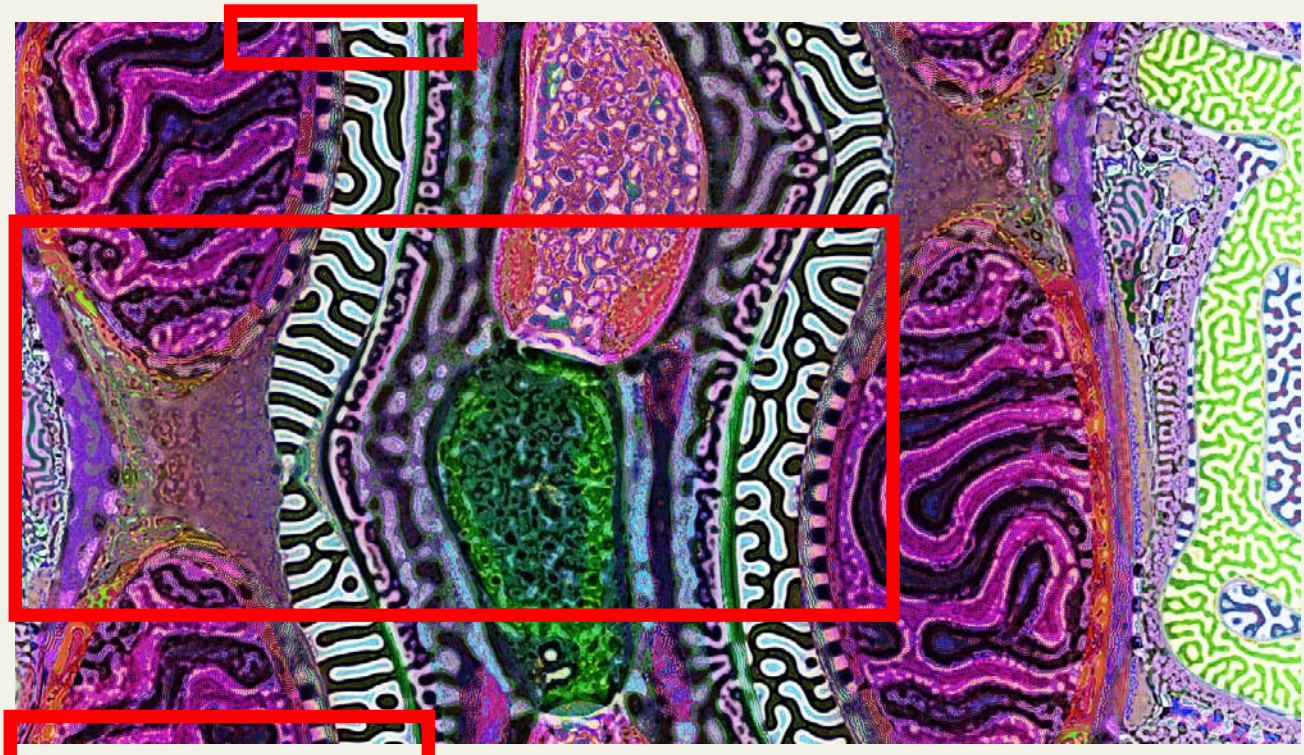
Des fugues de Bach, les *Cut-up* de Burroughs, les textes Dada et de l'Oulipo sont autant d'exemples d'art génératif.

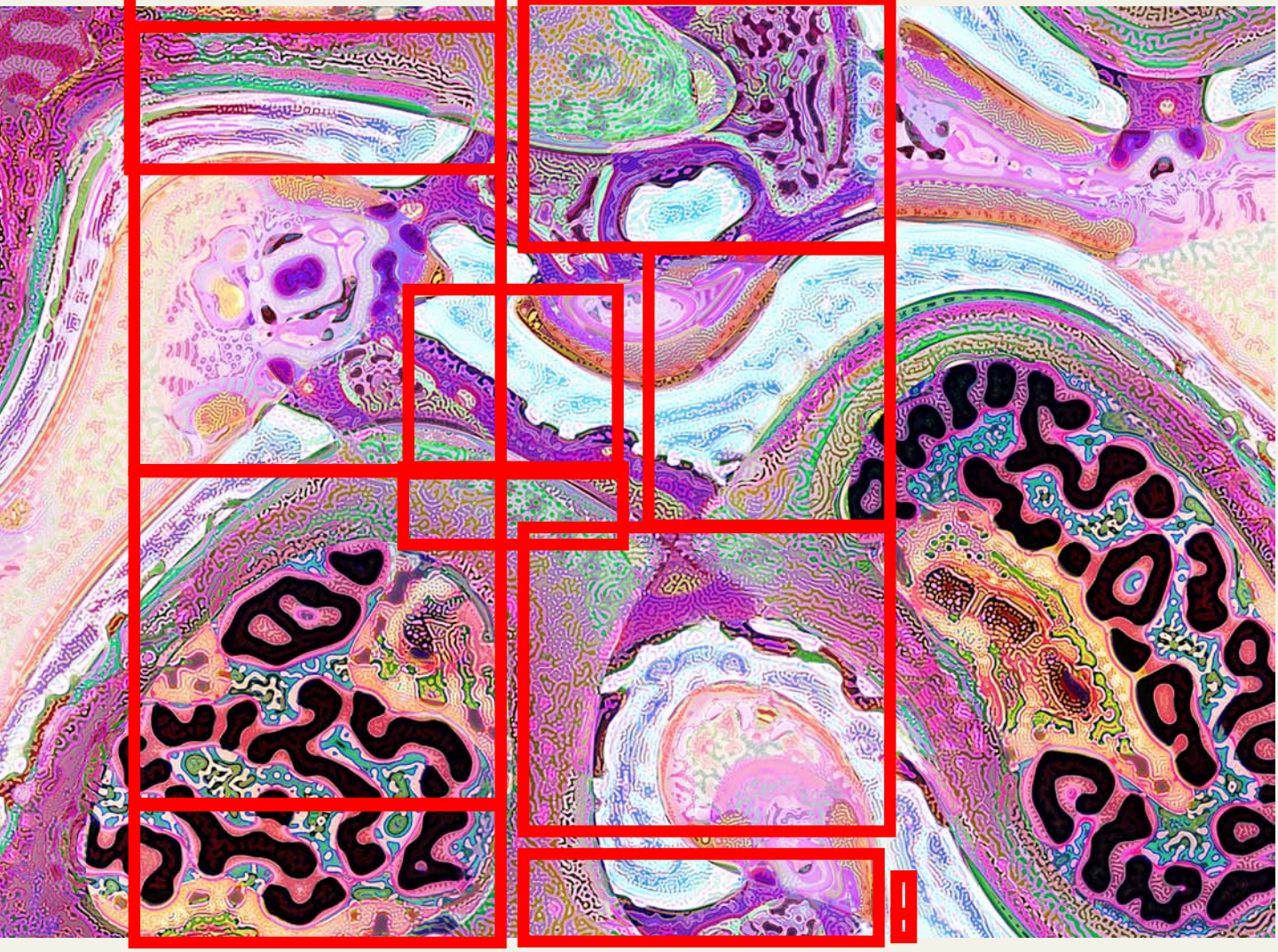
J. McCormack *et al.*, **Ten questions concerning generative computer art**, *Leonardo*, vol. 47, n° 2, pp. 135-141, 2014.

Œuvres de J. McCabe : http://bit.ly/PLS-McCabe



© J. McCabe





IDÉES DE PHYSIQUE

Des frites sous haute tension

L'application de puissantes impulsions de champ électrique à des pommes de terre facilite la découpe des frites et améliore leur cuisson.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Des frites ou des chips moins grasses et de bel aspect, même après décongélation ? Depuis plusieurs années, l'industrie agroalimentaire a inclus dans les chaînes de production de ces aliments une étape où la pomme de terre est soumise à des hautes tensions. En appliquant un champ électrique adéquat, on peut en effet fragiliser ou détruire des cellules, et ainsi modifier les propriétés du matériau biologique. L'effet biophysique en jeu est nommé électroporation. En quoi consiste-t-il et quels sont ses atouts ?

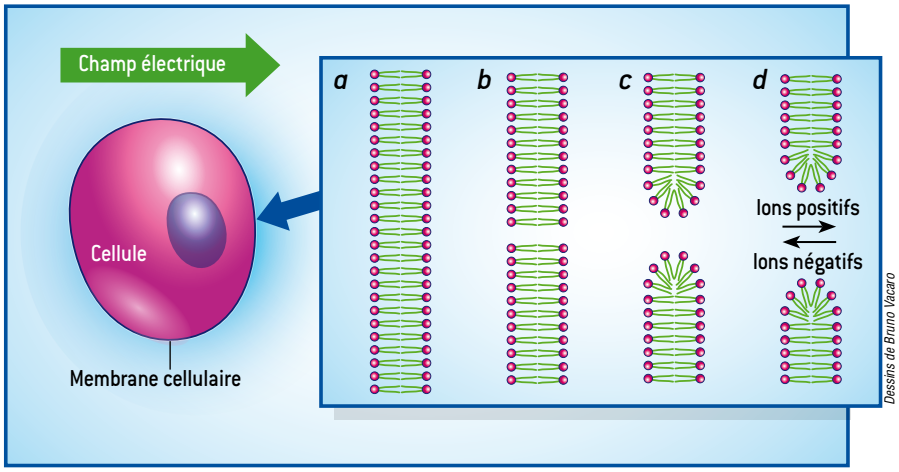
Des trous dans les cellules

Examinons ce qui se passe quand une cellule vivante est soumise à un champ électrique intense. La membrane cellulaire est constituée principalement d'une double couche de molécules lipidiques de quelques nanomètres d'épaisseur, qui sépare le milieu intracellulaire de son environnement *(voir la figure 1)*. Cette bicouche se comporte comme un condensateur électrique chargé sous une tension de l'ordre de 0,1 volt ; ce « potentiel transmembranaire » est dû à un léger déséquilibre de la concentration des ions de part et d'autre de la membrane. Quand la membrane est soumise à un champ électrique suffisamment intense, elle « claque » : elle devient conductrice et perméable.

Ce claquage est dû à la formation de pores. En soi, la présence de pores n'est pas étonnante. En raison de l'agitation thermique des molécules, des trous dans la membrane peuvent se former spontanément, même en l'absence de champ ; mais ils sont minuscules (de l'ordre du nanomètre) et se referment très vite (à l'échelle de la nanoseconde). Par quel mécanisme le champ électrique les ouvre-t-il davantage et les stabilise-t-il ?

En fait, la question n'est pas totalement élucidée. Selon l'interprétation dominante, le champ électrique modifierait la différence de potentiel de part et d'autre de la membrane : il chargerait, grâce aux ions présents, les deux « armatures » de cette dernière et augmenterait ainsi la force qui réunit les deux couches lipidiques. Selon ce schéma, il s'ensuit une pression, d'origine électrostatique, qui amincit la membrane au point que cette dernière se déchire lorsque la surtension atteint une valeur de l'ordre du volt.

Une autre explication, qui n'est pas exclusive de la première, est que, à partir d'une certaine taille du pore, les molécules de la membrane se réorientent spontanément de façon à présenter leurs « têtes » face au milieu aqueux, situation énergétiquement



1. LA MEMBRANE QUI DÉLIMITE une cellule biologique est formée d'une double couche de molécules lipidiques ayant une « tête » *(en rose)* hydrophile et une « queue » *(en vert)* hydrophobe *(a)*. De minuscules ouvertures naissent spontanément sous l'effet de l'agitation thermique *(b)*. Si le pore est de taille suffisante, les molécules de la bicouche adoptent autour de lui une configuration énergétiquement plus favorable *(c)*. Un canal est ainsi formé, où peuvent passer des ions et des molécules d'eau. Un champ électrique intense favorise cette circulation, ce qui stabilise le pore et l'agrandit de façon irréversible *(d)*.

© Pour la Science - n° 444 - Octobre 2014

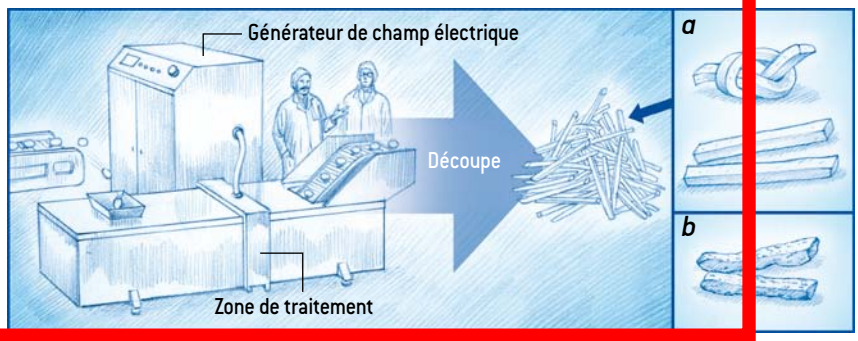
plus favorable (car la « tête » des molécules lipidiques est hydrophile, et leur « queue » hydrophobe). Il se forme ainsi un canal stable, où peuvent circuler les molécules d'eau et les ions *(voir la figure 1)*.

Le devenir de ces trous dépend cependant de la tension appliquée. Si elle reste modérée, les pores sont réversibles : une fois le champ supprimé, ils se referment. Mais au-delà d'un certain seuil de tension, la membrane est définitivement rompue et la cellule condamnée à mourir.

Par application médicale, on peut rendre sibles, par exemple pour tuer des cellules cancéreuses ou des bactéries. Mais un autre intérêt de l'électroporation est que lorsque les membranes cellulaires sont percées, le contenu des cellules devient accessible. Autrement dit, l'électroporation facilite l'extraction ou la distillation à froid (donc sans les dénaturer) de composants tels que des arômes, des colorants, ou tout simplement les jus de fruits ou le sucre de la betterave.

La libération de l'eau contenue dans les cellules a par ailleurs des conséquences sur les propriétés mécaniques des fruits ou légumes traités. Les cellules végétales sont entourées d'une paroi cellulaire. Lorsque les cellules ont toute leur eau, les pressions exercées entre les cellules et leurs parois s'équilibrent, ce qui maintient la forme des cellules et confère de la rigidité au port du végétal lui-même. Si les cellules se vident d'eau, elles se rétractent ; l'équilibre est alors rompu et les parois cellulaires sont fragilisées. Autrement dit, le tissu végétal s'assouplit. La découpe en est facilitée : elle sera plus nette et exigera moins d'énergie. Ainsi, avec un traitement de pommes de terre par électroporation *(voir la figure 2)*, on peut diminuer de moitié la force nécessaire pour la découpe !

La libération de l'eau contenue dans les cellules améliore aussi les processus de congélation ou de séchage. Ainsi, quand on congèle des frites (ou des chips) traitées, les cristaux de glace se forment pour une grande part en dehors des cellules et détruisent donc moins ce qui reste des structures cellulaires : la décongélation fournira des frites moins endommagées.



2. L'APPLICATION D'UN CHAMP ÉLECTRIQUE intense et pulsé à des pommes de terre a pour effet de perforer les membranes cellulaires du légume, ce qui assouplit ses tissus (au point de pouvoir faire des nœuds…). La découpe des frites est alors plus facile et les surfaces de coupe sont beaucoup plus lisses *(a)* que celles des frites de pommes de terre non traitées *(b)*. On obtient ainsi des frites qui, notamment, absorbent moins d'huile à la cuisson.

Par ailleurs, si l'on fait sécher un pétale de chips dans de l'air chaud, l'évaporation s'amorce d'abord en surface, mais elle se poursuit par le transport de l'eau de l'intérieur du pétale jusqu'à l'extérieur – ce transport étant facilité par la circulation de l'eau dans le milieu extracellulaire. Dans une étuve à 50 °C, le taux d'humidité d'une rondelle de pomme de terre diminue ainsi de 80 % à 10 % en moins de deux heures, au lieu des deux heures et demie habituelles.

Des frites moins grasses

L'électroporation est aussi intéressante pour la friture. Quand on plonge une frite dans un bain d'huile chaude, l'eau du bâtonnet de pomme de terre commence à bouillir à sa surface et s'évacue à travers l'huile sous la forme de bulles. Par ailleurs, la couche de vapeur d'eau qui se forme à la surface de la frite conduit beaucoup moins bien la chaleur que l'eau liquide ; elle isole thermiquement la frite et limite la pénétration de l'huile.

Or les frites traitées par champ électrique développent une couche de vapeur plus épaisse que les frites non traitées, ce qui réduit la déshydratation de l'aliment et l'absorption d'huile (jusqu'à 30 % de matières grasses en moins). Qui plus est, la surface de la découpe étant plus nette et moins rugueuse, on a deux avantages supplémentaires. D'une part, la superficie totale de la frite en contact avec l'huile

■ 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

Retrouvez la rubrique Idées de physique sur www.pourlascience.fr

BIBLIOGRAPHIE

T. Kotnik *et al.*, **Cell membrane electroporation – Part 1 : The Phenomenon**, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 28(5), pp. 14-23, 2012.

A. Janositz *et al.*, **Pulsed electric fields and their impact on the diffusion characteristics of potato slices**, *Food Science and Technology*, vol. 44, pp. 1939-1945, 2011.

est inférieure ; d'autre part, le drainage de l'huile est facilité. Il en résulte des frites plus légères et plus croustillantes !

Quelles caractéristiques le champ électrique doit-il avoir dans les applications ci-dessus ? Tout d'abord, un champ continu est inutile : la perméabilisation de la membrane cellulaire est un phénomène dynamique qui, avec la réorganisation des charges dans les milieux intra- et extracellulaire, s'estompe en quelques dizaines de microseconde. Il vaut donc mieux produire des impulsions brèves et répétées pour un maximum d'efficacité.

Ensuite, sachant que la taille d'une cellule est de l'ordre de dix micromètres, des champs électriques d'intensité supérieure au kilovolt par centimètre sont nécessaires pour que la différence de potentiel à l'échelle de la cellule dépasse le volt, seuil approximatif pour que la membrane soit irréversiblement percée. Pour traiter des pommes de terre d'une dizaine de centimètres, il faut donc des tensions de l'ordre de dix kilovolts.

Comment créer ces hautes tensions et les pulser ? On utilise pour cela un générateur inventé par l'ingénieur allemand Erwin Otto Marx en 1924. Son principe est simple. Dans un premier temps, on charge des condensateurs en parallèle. Puis on bascule rapidement les connexions (la difficulté technique est là) afin de placer tous ces condensateurs en série. Le résultat est une tension égale à la tension initiale multipliée par le nombre de condensateurs. On déclenche alors l'impulsion électrique en faisant décharger ces condensateurs à travers deux électrodes, placées dans le réacteur d'électroporation où est traité l'aliment. ■

QUESTION AUX EXPERTS

Le vin blanc donne-t-il plus mal à la tête que les autres alcools ?

Toutes les boissons alcoolisées peuvent provoquer des maux de tête, et le vin blanc ne semble pas la pire...

Henri-Jean AUBIN

Les maux de tête causés par le vin ont été rapportés dès l'Antiquité. Dans son ouvrage *De arte medica*, le médecin romain Aulus Cornelius Celsus (–25 à 50) écrit : « Dans certains cas, il se déclare [dans la tête] une douleur plus vive, qui toutefois disparaît promptement et n'est pas mortelle ; celle-ci se manifeste sous l'influence du vin [...]. » En fait, toute boisson alcoolisée est susceptible de déclencher des maux de tête, immédiatement ou après un délai allant jusqu'à une douzaine d'heures.

Quels sont les composants des boissons alcoolisées qui déclenchent les douleurs ? L'éthanol, qui est avec l'eau le seul composant commun à toutes ces boissons, y participerait, mais il n'est semble-t-il pas le seul en cause.

En 2008, Paola Nicoletti, de l'Université de Florence, et ses collègues ont montré sur des cochons d'Inde qu'il provoque une hypersensibilité du nerf trijumeau (qui innerve la face), sans doute en partie responsable des maux de tête.

Une fois absorbé, l'éthanol est transformé en acétaldéhyde. L'accumulation de ce composé entraîne des symptômes désagréables : maux de tête, rougeur du visage, nausées, vomissements, malaise, palpitations... Chez la plupart des gens, l'acétaldéhyde est vite dégradé en acétate par [illegible]. Mais chez certaines personnes, pour des raisons génétiques, ont des enzymes peu efficaces, qui laissent une certaine quantité d'acétaldéhyde s'accumuler. De multiples enzymes sont impliquées dans la dégradation, et l'efficacité métabolique globale varie de façon continue dans la population, de sorte que ce mécanisme pourrait jouer un rôle plus ou moins important selon le profil génétique de chacun.

En 1987, Julia Littlewood, de l'Hôpital Queen Charlotte, à Londres, et ses collègues ont étudié des sujets prétendant que le vin rouge leur donnait mal à la tête, mais pas la vodka. Après confirmation de leurs affirmations, on a soupçonné l'intervention d'autres composés que l'éthanol dans les maux de tête.

De nombreux suspects

Les sulfites ont longtemps été incriminés, mais on pense aujourd'hui qu'ils ne jouent qu'un rôle marginal. En effet, ils sont présents dans de nombreux aliments (ils sont par exemple environ cinq fois plus abondants dans les fruits secs que dans le vin) qui ne sont pas associés à des céphalées. En outre, aucune étude n'a mis en évidence un lien entre sulfites et migraines.

L'histamine, la tyramine et les phényléthylamines ont aussi été soupçonnées, sans qu'aucune étude n'ait pu infirmer ou confirmer leur implication. Les tanins, les polyphénols [illegible] pourraient avoir un rôle, en déclenchant la libération de sérotonine, un neuromédiateur (une molécule assurant la communication entre neurones) qui semble impliqué dans les maux de tête.

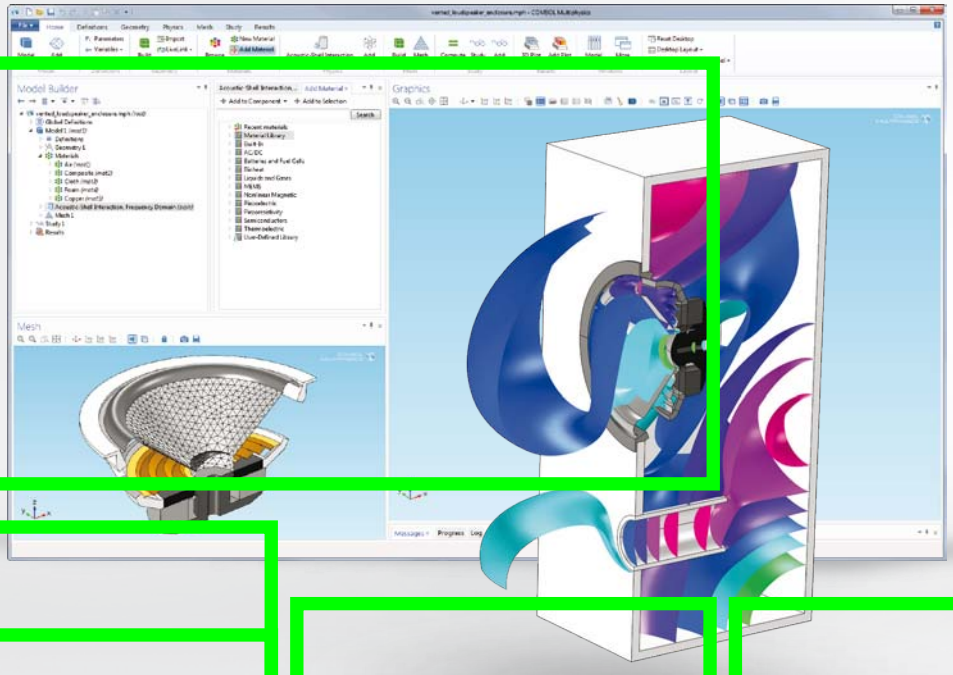
Quel est alors l'alcool qui donne le plus mal à la tête ? Il est difficile de trancher, en raison des variations métaboliques individuelles et parce que les composés soupçonnés se trouvent en proportions très variables dans les différentes boissons.

Les quelques enquêtes réalisées chez des patients migraineux donnent des résultats contradictoires. Ainsi, celle de Christian Wöber, de l'Université médicale de Vienne, en 2006, place le vin rouge en première position des boissons alcoolisées susceptibles de déclencher un mal de tête, devant le vin blanc, les alcools forts puis la bière, tandis que celle de Richard Peatfield, de l'Hôpital Charing Cross, à Londres, en 1995, incrimine d'abord la bière.

Nombre de chercheurs anglo-saxons pensent malgré tout que le vin rouge déclenche plus de céphalées que les autres boissons alcoolisées, même si toutes ces dernières peuvent en provoquer. Quelques neurologues bordelais ont incriminé le vin blanc dans les années 1980 et 1990, mais leurs travaux sont souvent jugés partisans. Pour trancher, il faudrait réaliser des études expérimentales chez l'humain, en comparant l'effet des doses et des alcools chez des personnes migraineuses et non migraineuses... ■

Henri-Jean AUBIN est professeur [illegible], praticien à l'Hôpital Paul Brousse et président de la Société française d'alcoologie.

ENCE[illegible]es 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 sim[illegible]tion multiphysique intègrent tous les effets ph[illegible]ues du monde réel. De ce fait, ils reproduisent av[illegible]précision le comportement de vos designs. Pour en [illegible]oir plus sur COMSOL Multiphysics, rendez-vous sur ww[illegible].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 Mo[illegible]e
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 Reaction Engineering Module
Batteries & Fuel Cells Module
Electrodeposition Module
Corrosion Module
Electrochemistry Module

MULTIPURP[illegible]SE
Optimization [illegible]dule
Material Libra[illegible]
Particle Tracin[illegible]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

COMSOL

© Copyright 2014 COMSOL. COMSOL, COMSOL Multiphysics, Capture the Concept, COMSOL Desktop, and LiveLink are either registered trademarks or trademarks of COMSOL AB. All other t[illegible]nd its subsidiaries and products are not affiliated with, endorsed by, sponsored by, or supported by those trademark owners. For a list of such trademark owners, see www.comsol.com/trademarks

SCIENCE & GASTRONOMIE

Vers une cuisine plus qualitative

Jusqu'où la précision de la cuisine pourra-t-elle s'améliorer en tenant compte des effets variés des différents composants ?

Hervé THIS

© Jean-Michel Thiriet

Le cuisinier français Auguste Escoffier espérait une cuisine précise : dans la préface du *Guide culinaire*, qu'il rédigea avec Émile Fetu et Philéas Gilbert, il écrit « En un mot, la cuisine, sans cesser d'être un art, deviendra scientifique et devra [illegible] riques trop souvent encore, à une méthode et à une précision qui ne laisseront rien au hasard. »

C'est cet espoir, sans doute, qui le conduisit, avec ses coauteurs, à prescrire des quantités de sel égales à « 32 centigrammes » (précision inaccessible aux balances de cuisine). En réalité, la précision en cuisine sera difficile à accroître. Notamment, les pâtissiers savent que les farines contiennent des quantités variables de protéines ; de plus, la nature de ces dernières est essentielle. Le « gluten », ce réseau viscoélastique qui se forme quand on pétrit la farine avec de l'eau, dépend ainsi de la nature des protéines du blé, de sorte que le comportement de la pâte est une surprise toujours renouvelée.

Similairement, la tendreté des viandes dépend de la quantité de tissu collagénique qui gaine les fibres musculaires et qui groupe ces fibres en faisceaux, mais aussi de détails chimiques, tels que les forces entre protéines voisines, lesquelles dépendent de l'animal particulier d'où provient la viande.

Pour les fruits et les légumes, aussi, la variabilité est considérable, non seulement entre les variétés, mais jusque dans l'intimité de ces denrées. Récemment, alors que nous examinions les performances d'une nouvelle méthode d'analyse par spectroscopie de résonance magnétique nucléaire quantitative *in situ*, nous avons étudié la répartition des saccharides majoritaires – glucose, fructose, saccharose – dans des [illegible] vers la partie corticale, ces concentrations en saccharides diffèrent ; de même, la concentration en saccharides n'est pas la même dans la partie supérieure et dans la partie inférieure d'une même carotte, avec des variations différentes radialement.

La précision en cuisine est-elle un vain rêve ? La « cuisine note à note » qui produit des mets à partir de composés purs, apportera-t-elle une solution ? « Le simple est toujours faux, disait Paul Valéry ; ce qui ne l'est pas est inutilisable ». Cependant, la pureté absolue n'existe pas en matière de chimie.

Par exemple, si l'on utilise du limonène pour donner un goût de citrus à des mets (le limonène est extrait des peaux de citron, d'orange, de pamplemousse), on n'aura pas une odeur constante, l'industrie des parfums sait bien que, selon l'origine du composé, on peut obtenir des odeurs différentes, parce que les « impuretés » qui accompagnent toujours [illegible] peuvent être à l'état de traces, indétectables à l'analyse avec les meilleurs instruments actuels, mais à l'odeur prépondérante.

Par ailleurs, dans la description des mets du futur, on aura donc intérêt à ne pas confondre composition et effet sensoriel. Par exemple, la concentration en composés sapides sera toujours bien supérieure à la composition en composés odorants. L'eau, par exemple, est majoritaire dans les mets, mais son effet sensoriel est faible, sauf pour la consistance. Autrement dit, la construction des mets du futur, si elle passe par des descriptions à divers ordres de grandeur, distinguera des ordres de grandeur de consistance, d'odeur, de saveur, de couleur.

La belle question de la cuisine du futur est donc moins la précision que de savoir comment des composés ayant un effet d'un type donné (par exemple olfactif) ont une influence sur un autre aspect (par exemple, sapide). Ou de savoir comment des composés présents en petite quantité ont des influences essentielles. Par exemple, travaillons de la farine avec de l'eau pour obtenir un pâton ferme, puis ajoutons un peu de sucre : le pâton s'effondre, parce que le sucre a capté l'eau qui tenait le réseau de gluten. Ce qui semble être un désastreux résultat est en réalité la possibilité de faire des pâtes à tarte bien plus friables que celles que font nombre de pâtissiers amateurs. ■

Hervé THIS est physico-chimiste dans le Groupe INRA-AgroParisTech de gastronomie moléculaire et directeur scientifique de la Fondation Science & culture alimentaire (Académie des sciences).

L'art des objets de la Préhistoire

Patrick Paillet

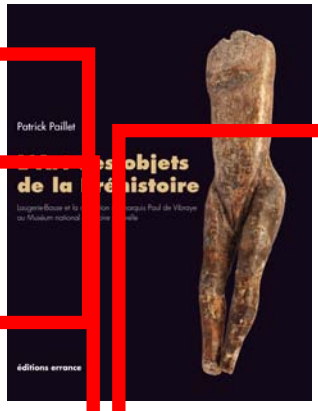
Errance, 2014
(250 pages, 39 euros).

Il n'y avait guère d'études sur la vie, l'œuvre et les collections du Marquis Paul de Vibraye (1809-1878). Cet archéologue et grand érudit s'intéressa passionnément à la préhistoire de l'Homme au cours de la seconde moitié du XIXe siècle. Il fut sans doute le premier à fouiller les gisements paléolithiques de la vallée de la Vézère, aux environs des Eyzies, si célèbres aujourd'hui. Ce livre comble donc une lacune.

Son auteur s'est attaché à l'étude des nombreux objets provenant des fouilles et des collections du Marquis. Celles du site de Laugerie-Basse, qui font l'objet de cet ouvrage, ont livré, outre une abondante industrie lithique et osseuse datant du Magdalénien (17000-12000), une série d'objets d'art mobilier. Le plus remarquable est sans doute la fameuse Vénus impudique, une silhouette féminine longiligne taillée dans l'ivoire, sans tête, au sexe bien marqué et au bas du corps remarquablement sculpté. Elle fut la première Vénus paléolithique découverte et nommée.

À une étude biographique de ce savant atypique succède une présentation de ses collections qui s'attache à différents aspects de leur histoire, depuis les fouilles qui ont mis les objets au jour jusqu'à leurs présentations dans les expositions universelles successives, puis dans les musées. Les objets sont étudiés dans un ordre thématique, qui associe une présentation rigoureuse et un commentaire sensible et intéressant, à une iconographie très soignée, notamment grâce aux photographies de question passionnante de l'objet d'art paléolithique, par différence avec l'art pariétal peint ou gravé, est évoquée en quelques pages au début et à la fin du livre : elle pourrait ouvrir sur une réflexion de plus grande ampleur touchant à l'objet en préhistoire et à l'objet d'art en général.

Ce livre, publié à l'occasion du récolement des collections de préhistoire du musée de l'Homme



en vue de leur déménagement dans les locaux restaurés, combine la forme d'un catalogue d'exposition et celle de l'essai historique. Les notations, citations et réflexions intéressantes qu'il contient éclairent un aspect important de notre patrimoine archéologique.

Claudine Cohen
EHESS/EPHE, Paris

■ HISTOIRE DES SCIENCES

Une histoire de la chimie du solide

Pierre Teissier

Hermann, 2014
(516 pages, 28 euros).

L'histoire ici présentée est très spécialisée, mais l'auteur la traite comme une étude de cas qui pose d'une façon plus générale, la question de l'émergence d'une nouvelle discipline scientifique. Étudiés depuis longtemps, les solides n'ont pas donné naissance à une discipline propre avant la seconde moitié du XXe siècle. C'est pourquoi l'auteur commence son récit par une « épistémologie du solide cristallin de 1770 à 1940 », c'est-à-dire une étude des discours, des pratiques et des raisonnements des savants, des conditions d'existence des sciences, et des régimes de preuve mis en place. Il appliquera d'ailleurs cette définition à l'ensemble de l'ouvrage dont la période principale court des années 1950 aux années 1980, mais s'étend jusqu'à aujourd'hui. Centré sur le cas français qui a tenu un rôle international majeur, le livre s'achève sur une étude comparative du développement de la chimie du solide dans quatre blocs (Europe continentale, Royaume-Uni, Europe de l'Est, Amérique du Nord). Pour des raisons d'accessibilité aux sources, le bloc asiatique est laissé de côté.

Après la Libération, l'approche structurale de la chimie de la fin des années 1930 commence à se diffuser en Europe continentale pour s'implanter vraiment en France à la fin des années 1950. Elle est au cœur de la nouvelle discipline. L'état solide est un objet d'étude que l'on partage nécessairement, au carrefour de disciplines diverses, et qui intéresse l'industrie.

Dans les années 1950, cette interdisciplinarité va bien au-delà des relations personnelles et des échanges de pratiques et se manifester par séminaires ou colloques, rendant visible une nouvelle communauté. L'institutionnalisation est alors favorisée par la création de revues spécifiques et reconnue par le CNRS. Les intitulés des laboratoires évoluent. À partir des années 1960, les « solidistes » ont désormais un sentiment identitaire fort ; ils se reconnaissent dans une « matrice disciplinaire standardisée » et appartiennent à des institutions dédiées.

Dans le dernier tiers du XXe siècle, la chimie du solide essaime : « chimie douce », chimie « sol-gel » à la frontière organique / minérale, plus tard des composés hybrides tels les solides poreux… Des briques de construction à l'édifice complexe, l'alliance des simulations structurales et d'une instrumentation de pointe dévoile les modes de réactivité. Puis à la chimie du solide succède la science des matériaux. Enfin, s'y ajoute l'échelle « nano ».

Nous aurions pu aborder cette analyse autrement. En effet, l'auteur nous livre une histoire de la politique scientifique française après la Libération, sa place dans les Plans successifs, les stratégies économiques de développement qui lui sont liées, et aussi une histoire d'hommes (avec peu de place aux femmes) quasiment ethnologique. On s'y reconnaît à travers certains rites et attitudes, qui évoluent par ruptures théoriques ou de pratiques.

L'auteur ne manque pas d'humour, toujours chaleureux : deux pages proposent une « légende » de la chimie du solide en France véritablement délicieuse. Un livre dense, extrêmement référencé et

© Pour la Science - n° 444 - Octobre 2014

t une grande richesse, qui se lit comme un roman épique et où es sources orales ne sont pas les moindres des pépites.

Danie e Fauque
GHDSO, Université aris-Sud

ÉTHOLOGIE

Trois prédateurs dans un salon

Pierre Jouvente

Belin, 2014
(271 pages, 18 euros).

Voici une fable, qui vous entraîne... dans votre salon ! Vous y retrouverez le chat, e mini-fauve, qui fait entrer la ungle dans notre intimité avec une grande délicatesse, et le hien, éternel ado proche de la perfection sociale de son ancêtre e loup, avec sa capacité d'empathie, de partage, d'entraide et d'altruisme. L'homme est là aussi, e singe génial et original qui se approche finalement beaucoup des canidés sociaux quand on parle de mode de vie. Même si nous l'avons oublié, nous avons ongtemps chassé en clan comme e loup et nous formons avec nos compagnons domestiques un beau rio de prédateurs.

L'auteur décode les comportements de chacun, nous initiant ainsi à l'éthologie. On entre dans l'intimité du chien et du chat en remontant à leurs racines sauvages. Car comprendre ces mœurs ancestrales est essentiel pour l'harmonie que nous souhaitons vivre avec eux. C'est en effet du fait de leurs qualités de chasseurs que nos ancêtres préhistoriques s'en sont fait des alliés. La domestication du loup pourrait être à l'origine de l'émergence de l'homme moderne, à qui son nouveau compagnon aurait donné un avantage décisif. La sélection de loups plus dociles

et plus petits a permis de limiter les conflits avec l'homme, et le chien est devenu le partenaire essentiel du chasseur-cueilleur, même lors de sa conversion à l'agriculture et à l'élevage.

Le chat, excellent chasseur, plus facile à vivre que les autres petits prédateurs, a vite détrôné genettes, belettes et furets dans nos foyers. Maudit de la Chrétienté et persécuté avec les sorcières, il est réhabilité au XIX[e] siècle en symbole du romantisme et de l'anarchie. Sa réputation n'a pas faibli depuis et il incarne aujourd'hui la féminité, le mystère, l'indépendance, la transgression…alors que le chien représente plutôt l'ordre.

Notre re… place à une relation affective où l'animal de compagnie n'a plus à travailler. Cette famille recomposée… grandes questions de l'éthologie elles que la culture, la morale, le sexe, la conscience… Ce livre contribue à réenchanter le monde en nous offrant d'autres moyens de le comprendre. L'étude de notre… l'animale offre un surcroît d'humanité !

Fanélie Wanert
Centre de primatologie de l'Université de Strasbourg

PHYSIQUE

Le monde quantique

B. d'Espagnat et H. Zwirn (dir.)

Matériologiques, 2014
(428 pages, 22 euros).

Ce livre rend compte des débats entre physiciens et philosophes qui se sont enus de 2010 à 2012 à l'Institut de France, sous l'égide de l'Académie des sciences morales et politiques et du Collège de physique et de philosophie. Ces débats ont regroupé la plupart des spécialistes français des aspects fondamentaux de la mécanique quantique. On y trouve des exposés de Roger Balian, Édouard Brézin, Franck Laloë, Jean-Michel Raimond, Carlo Rovelli, Matteo Smerlack, ainsi que des interventions des nombreux participants, dont les coordonnateurs de l'ouvrage Bernard d'Espagnat et Hervé Zwirn.

Le problème fondamental posé par la physique quantique est simple à énoncer : la formulation même de cette théorie fait référence à la notion d'observation ou d'observateur ou de mesure. Pas simplement parce que l'observation est indispensable pour vérifier les théories, ce qui est le cas dans toutes les sciences, mais parce que la notion d'observation entre dans les énoncés de base de la théorie quantique.

Comment une théorie, qui est la plus fondamentale de toutes, qui traite des atomes, des électrons et des photons et qui s'applique en principe à tout l'Univers, peut-elle avoir besoin, pour être formulée, de quelque chose d'aussi contingent que des mesures faites en laboratoire depuis une centaine d'années par quelques représentants d'une espèce animale particulière, *Homo sapiens* ?

Sexe, race & culture

Patrick Tort

Textuel, 2014
(108 pages, 16 euros).

Il faut du biologique pour faire du social, mais le social ne se réduit pas au biologique. Le genre, construction culturelle visant à nous affranchir du sexe, ne peut être défini sans... lui. Interrogé par l'anthropologue Régis Meyran, le philosophe et historien des sciences Patrick Tort discute des notions de sexe biologique, de race, de genre, de leurs rapports ainsi que des enjeux qui leur sont associés. Facile à suivre, mais toujours en subtilité, il nous aide à dépasser les conflits corporatistes entre sciences humaines et sciences du vivant, afin d'échapper aux postures doctrinales du tout biologique ou du tout culturel.

Tous les champignons portent-ils un chapeau ?

Francis Martin

Quæ, 2014
(184 pages, 22 euros).

L'auteur livre 90 paragraphes complétés d'encadrés où il explique les champignons. On apprend ainsi que ces organismes eucaryotes sont souvent indispensables à la vie des végétaux ; on comprend aussi leur grande utilité : ils sont nécessaires à la fabrication du pain, du vin, de la bière, du chocolat, etc. et nous fournissent en antibiotiques. Et ce qui ne gâche rien, ce livre est aussi un puits de culture sur les champignons consommables, dont c'est encore la saison.

Textiles, parfums, bijoux et Cie

Muriel Chiron-Charrier

EDP-Sciences, 2014
(176 pages, 12 euros).

Cet ouvrage savoureux démontre qu'il est possible de mélanger mode – sujet que l'on pourrait croire frivole – et chimie. Sur un ton amusant, l'auteure répond avec sérieux à de nombreuses questions. D'où viennent les différentes propriétés du lin, du coton et de la laine ? Quels ingrédients inattendus entrent dans la composition d'un parfum ? Saupoudrés d'histoire des techniques, les petits articles abordent des questions simples que chacun pourrait se poser le matin en se demandant comment s'habiller.

Relativité générale

Thomas Moore

De Boeck, 2014

L'auteur a réussi un ouvrage accessible sur la théorie de la relativité générale, qui conviendra bien aux étudiants de dernière année de licence. Il parvient à... relativiser les grandes difficultés techniques de ce domaine par une organisation efficace du livre. Dans chaque chapitre, il présente les concepts en quelques pages, démontre les formules essentielles au sein d'encadrés spécifiques. Le manuel fait aussi la part belle aux applications de la relativité. En résumé, un ouvrage incontournable pour ceux qui veulent vraiment comprendre les ondes gravitationnelles ou les trous noirs !

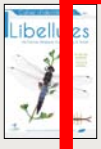
L'homme de Tautavel

H. de Lumley (dir.)

Éditions du patrimoine, 2014
(128 pages, 18 euros).

Les plus anciens fossiles humains de France, ceux des représentants de l'espèce *Homo heidelbergensis*, ont été découverts dans la grotte de la Caune de l'Arago, non loin du village de Tautavel dans les Pyrénées orientales. Écrit par les principaux acteurs de la recherche sur l'homme de Tautavel, ce petit ouvrage fort bien illustré résume tous les aspects essentiels de ce que l'on a pu apprendre sur l'habitat, l'environnement et la vie des hommes qui, il y a entre 450 000 et 300 000 ans, ont occupé la grotte.

Cahier d'identification des libellules de France, Belgique, Luxembourg et Suisse



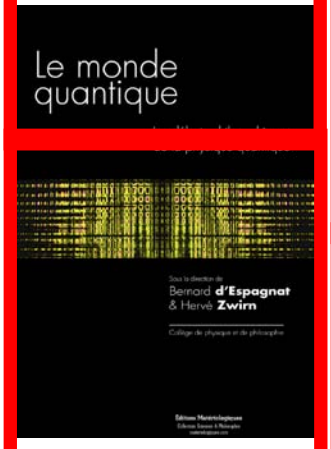
D. Grand *et al.*,

Biotope, 2014
(136 pages, 24,90 euros).

Ce livre est conçu pour identifier sur le terrain les 103 espèces de libellules rencontrées dans la région couverte. Certes, le format dépasse un peu de la poche du gilet. Mais, après s'être familiarisé avec les codes couleurs des clefs d'identification, détaillées et fort bien illustrées de dessins et de photographies, l'ouvrage se révèle d'une grande utilité pour l'amateur de ces insectes gracieux que sont les odonates. De plus, il a l'originalité de traiter à la fois des larves et des stades adultes.

Pourtant, comme le montre F. Laloë, il existe une théorie, proposée dès le début de la physique quantique en 1927 par le Français Louis de Broglie et reprise et développée par l'Américain David Bohm en 1952, dont les prédictions empiriques coïncident avec celles de la mécanique quantique ordinaire, et qui élimine toute référence à l'observation ou à la mesure.

Il est assez intéressant d'observer la présence de scepticisme et d'hostilité face à cette théorie chez de nombreux participants, hostilité qui reflète chez certains des préjugés philosophiques idéalistes ou anti-réalistes. Cela illustre



aussi l'adage selon lequel nul, y compris de Broglie, n'est prophète dans son pays.

Un des aspects les plus intéressants du livre est qu'il s'agit d'un débat où toutes les questions sont posées et où tous les points de vue sont représentés. Il faut en rendre hommage aux coordinateurs de ces rencontres et en particulier à B. d'Espagnat, qui a consacré de nombreux efforts pour ouvrir en France les discussions sur la physique quantique et les questions qu'elle soulève, trop souvent ignorées même par les p[illegible]

Jean Bricmont

Université catholique de Louvain

ARCHÉOLOGIE EXPÉRIMENTALE

Les gladiateurs

François Gilbert

Errance, 2014
(111 pages, 29 euros)

Grande fut notre surprise de découvrir cet ouvrage : la même maison avait publié en 2005 un livre portant le même titre, *Gladiateurs*, mais rédigé par deux auteurs différents de celui-ci, É. Teyssier et B. Lopez ; nous en avions publié un compte-rendu ici-même.

Certes, dans les deux ouvrages, on trouvera un même contenu et une même méthode. Des jeunes gens, qui souhaitaient utiliser intelligemment leurs loisirs, ont fait des recherches pour reconstituer des équipements de soldats d'abord, de gladiateurs ensuite. Ce qui n'était au début qu'un jeu devint vite une science. En effet, les spécialistes se rendirent compte que ces déguisements permettaient de comprendre comment les anciens utilisaient le matériel qui avait été mis à leur disposition. Ces amateurs avaient fondé, sans le savoir, une nouvelle discipline, l'archéologie expérimentale, qui a maintenant ses entrées dans les congrès, au même titre que l'épigraphie ou la philologie.

En s'attachant aux gladiateurs, ils abordaient un champ nouveau. On sait que cet art des combats, importé à Rome depuis la Grèce, en passant par l'Étrurie, a été inventé pour les funérailles des grands. Il était sans aucun doute un substitut aux sacrifices humains, et il est devenu un spectacle des plus prisés. Le but du jeu était de voir combattre à mort deux hommes dotés d'armes différentes : un lourd

contre un léger, une épée courbe contre un trident, etc. Mais, si les hommes du peuple étaient friands de ces combats, les intellectuels les méprisaient et les grands évitaient de s'y rendre, sauf quand ils voulaient plaire à la populace pour une raison ou pour une autre.

Le livre de F. Gilbert diffère par sa conception de celui qui avait été écrit par É. Teyssier et B. Lopez. Le premier était anarchique ; le second est thématique, mais il permet, en promenant le [illegible] image, de lui faire connaître tous les types de gladiateurs. Le plus ancien de la liste, un Samnite, a vécu vers 300 avant notre ère en Campanie, une région qui avait reçu des influences grecques et étrusques. Suivent, parmi les plus intéressants : un rétiaire de Lugudunum vers 20 avant notre ère ; un hoplomaque de Pompéi vers 50 ; un thrace des environs de 30. Le dernier de la liste est un mirmillon qui a combattu vers 200 de notre ère. Un glossaire et une courte bibliographie, où l'on retrouve l'ouvrage fondamental de G. Ville, sur la gladiature, viennent clôturer ce livre bien illustré, de ce point de vue très semblable au Teyssier-Lopez.

Yann Le Bohec

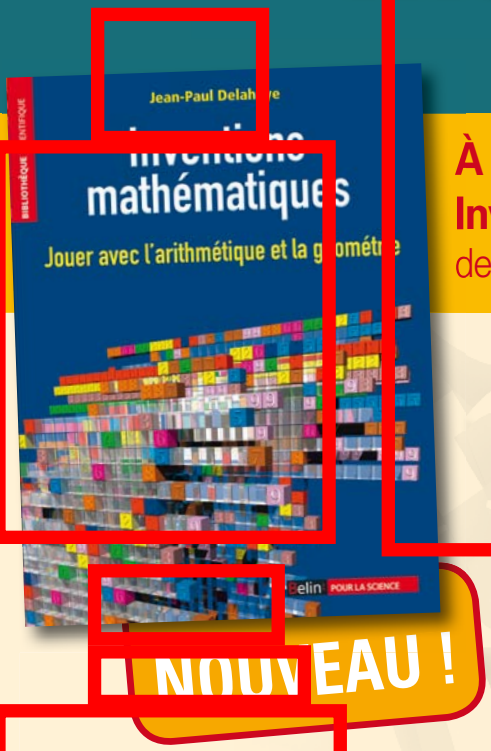
Professeur émérite à l'Université Paris IV-Sorbonne

Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur www.pourlascience.fr

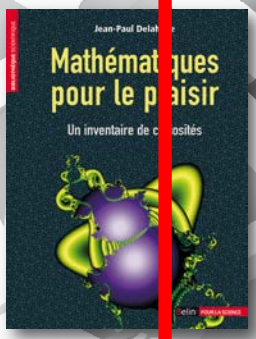
© Pour la Science - n° 444 - Octobre 2014

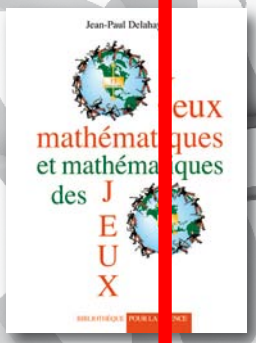
L'univers mathématique

de Jean-Paul Delahaye



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





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 !

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**

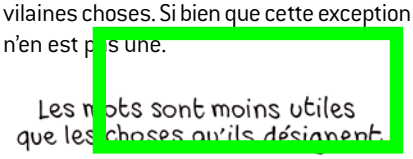
BLOC-NOTES
de Didier Nordon

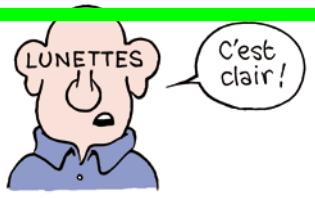
LES MOTS POUR LE DIRE

L'univers des mots et celui des réalités matérielles sont disjoints : le mot *chien* ne mord pas. On ne peut jamais dire une chose, on ne peut que dire le mot qui la désigne.

Comment cela, on ne peut jamais dire une chose ? Le français regorge d'expressions comme : « Dites-lui bien des choses de ma part », « J'ai plusieurs choses à dire sur ce sujet », « Il a beaucoup parlé, mais a dit peu de choses », etc. Le français réussit l'impossible : il dit des choses !

Il y a certes un cas où il dit des mots. Seulement, l'expression « Ils se sont dit des mots » (ou, plus couramment, « Ils ont eu des mots ») signifie qu'ils se sont dit de vilaines choses. Si bien que cette exception n'en est pas une.





OÙ EST LE PROBLÈME ?

Supposons le problème résolu, dit le mathématicien, et il fait sourire certains : encore un qui prend son désir pour la réalité. Ils se trompent. Il explore la situation à l'aide d'une expérience de pensée. Supposer le problème résolu est un moyen de chercher des pistes pour le résoudre.

Mais il existe des auteurs qui, en supposant le problème résolu, prennent leur désir pour la réalité. C'est le cas de ceux qui sont convaincus que la postérité ratifiera leur jugement (sur la gloire promise à tel artiste, par exemple, ou sur la responsabilité devant l'histoire future de tel courant de pensée actuel). En appelant la postérité à la rescousse, ils révèlent leur manque d'arguments. La postérité consent en effet toujours à tout ce qu'on lui fait dire, donc son consentement ne prouve rien. En s'appuyant dessus, ils donnent à entendre qu'ils ne disposent pas d'arguments ayant plus de valeur que ce rien !

Le jugement de la postérité est un problème. Pour pouvoir le supposer résolu, il faut être mort depuis longtemps…

BEAU SUJET, RÉFLÉCHIR TU ME FAIS…

Un sujet (de conférence, de livre, de recherche) peut, ou non, être intéressant, utile, pointu. Il peut aussi être beau. Cette notion, je crois, est subjective. Voici l'idée que je m'en fais.

Je ne puis trouver beau un sujet spécialisé. (Laissons de côté l'expression « beau sujet de thèse », qui signifie : « sujet permettant à un doctorant d'obtenir vite son diplôme ».) Un sujet me paraît beau si son énoncé unifie des thèmes *a priori* disparates. Il suscite des rapprochements et invite à partir dans des directions variées. Cristallisant, d'une formule pénétrante, des idées diffuses, il met mon imagination en branle, même s'il relève d'un domaine que je connais peu. Inattendu, il acquiert une évidence sitôt énoncé, parce qu'il me mène à découvrir des idées qui étaient en moi confusément. Je puis l'aborder à ma façon, donc le faire mien. Quitte à être déçu si l'auteur va dans une direction autre. Un des plus beaux titres que je connaisse est *La pesanteur et la grâce*, mais je n'ai jamais pu lire ce livre. Les songeries que le titre induit en moi, sans rapport avec les idées de Simone Weil, me parasitent trop. J'ai eu plus de chance avec le colloque *Qu'est-ce qu'on ne sait pas* ? N'y ayant pas assisté, j'ai toute latitude pour imaginer ce que ce beau sujet a inspiré aux orateurs.

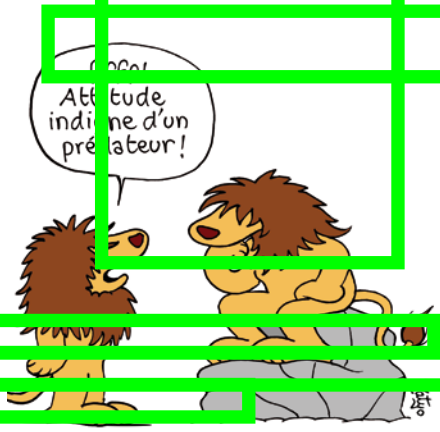
La richesse d'un beau sujet vient du fait qu'il laisse beaucoup de liberté… au sujet – je veux dire à l'humain qui y réfléchit. La notion de beau sujet ne s'applique pas tout ce à quoi il invite est bon à explorer. L'idée de beau sujet est à l'opposé de la conception scolaire du sujet : celle-ci découpe le monde en tranches et sanctionne le candidat qui « sort du sujet ».

Si, un jour, on me demande un sujet de dissertation, je proposerai : « Qu'est-ce qu'un beau sujet ? » Ce sera un beau sujet.

L'HOMME EN MARCHE

La popularité est promise à l'homme d'action plus souvent qu'au penseur. C'est que le premier entraîne les autres dans une direction, alors que le second interroge. Or les hommes sont attirés par le mouvement plus que par l'immobilité. Se lancer dans une direction satisfait cette attirance, s'arrêter pour réfléchir ne la satisfait pas.

L'immobilité n'est pas exaltante – que ce soit celle du guetteur ou celle de la proie terrée. Attaquer, donc créer un mouvement, voilà ce qui est excitant. Préférer le mouvement à l'immobilité, et l'homme d'action au penseur, est typique de notre espèce prédatrice.



Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal 5636 – Octobre 2014 – N° d'édition M0770444-01 – Commission paritaire n° 0917 K 82079 – Distribution : Presstalis – ISSN 0 153-4092 – N° d'imprimeur 101 192 248 – Directrice de la publication et gérante : Sylvie Marcé.

DÉCOUVREZ NOS OUVRAGES EN ASTRONOMIE ET GÉOGRAPHIE !

avec de nombreuses illustrations en couleurs !

L'EXPLORATION DU SYSTÈME SOLAIRE

À partir des plus récentes découvertes de l'exploration du système solaire, Peter Bond offre un panorama exhaustif et exemplaire des planètes, lunes et autres petits corps en orbite autour du Soleil et des étoiles proches. Destiné aux lecteurs ne possédant que peu de connaissances scientifiques, cet ouvrage prouve que la planétologie peut être racontée comme un roman policier !

Peter BOND
Traduction de Nicolas Dupont-Bloch
470 pages • 54 €

TERRE, PORTRAIT D'UNE PLANÈTE

Terre, portrait d'une planète est un ouvrage de référence en sciences de la Terre. Pédagogique et richement illustré, il permet de comprendre l'origine de la Terre, la diversité de ses ressources et de ses paysages, et aussi d'appréhender les défis futurs.

Stephen MARSHAK
Traduction d'Olivier Evrard
1000 pages • 88 €

À LA DÉCOUVERTE DE L'UNIVERS

Introduction à l'astronomie et à l'astrophysique

À la découverte de l'Univers conduit le lecteur jusqu'aux confins du système solaire et au-delà, à la lumière des plus récentes découvertes de l'astronomie et de l'astrophysique.

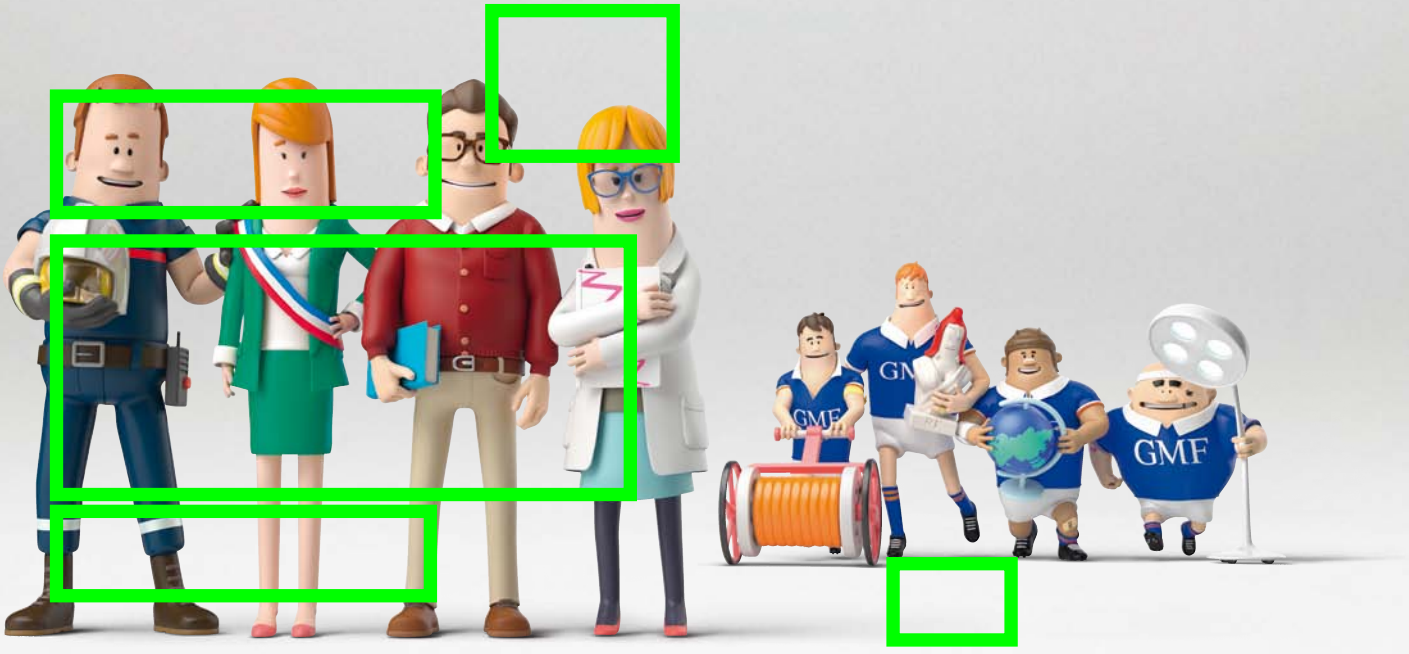
Neil COMINS
Traduction de Richard Taillet et Loïc Villain
570 pages • 49,90 €

de boeck

En librairie et sur www.deboeck.fr

TBWA\PARIS

Votre vocation fait votre fierté,
la nôtre est de vous assurer.



Exercer son talent au service des autres est une mission que nous partageons. C'est pourquoi, **la GMF, 1er assureur des agents des services publics** en fait toujours plus pour vous assurer dans votre vie personnelle (assurance auto, habitation, complémentaire santé, vie, épargne) et vous accompagner dans votre vie professionnelle. À votre tour, rejoignez nos 3 millions de sociétaires pour profiter **des offres privilégiées** que nous vous réservons.

POUR LES MOINS DE 30 ANS

50 € OFFERTS*

SUR VOTRE ASSURANCE AUTO

Renseignez-vous au **0 970 809 809** (numéro non surtaxé) ou sur **www.gmf.fr**

*Offre réservée aux agents des services publics de moins de 30 ans, la 1re année, à la souscription d'un contrat d'assurance auto, valable jusqu'au 31/12/2014.

LA GARANTIE MUTUELLE DES FONCTIONNAIRES et employés de l'État et des services publics et assimilés - Société d'assurance mutuelle - Entreprise régie par le Code des assurances - R.C.S. Paris 775 691 140 - Siège social : 76, rue de Prony - 75857 Paris Cedex 17 et ses filiales GMF Assurances, La Sauvegarde et GMF Vie. Adresse postale : 45930 Orléans Cedex 9.

ASSURANCES MUTUELLES DE FRANCE - Société d'assurance mutuelle - Entreprise régie par le Code des assurances - R.C.S. Paris 323 562 678 - Siège social : 11, place des Cinq Martyrs du Lycée Buffon - 75014 Paris. Adresse postale : 45930 Orléans Cedex 9.

80 ans GMF

ASSURÉMENT *humain*