ENERGIE
Des gisements d'hydrogène naturel !

NEUROSCIENCES
L'étonnant cerveau des adolescents

ASTROPHYSIQUE
Trous noirs : un horizon de feu ?

POUR LA SCIENCE

Octobre 2015 - n° 456 | www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

CRISPR-Cas9

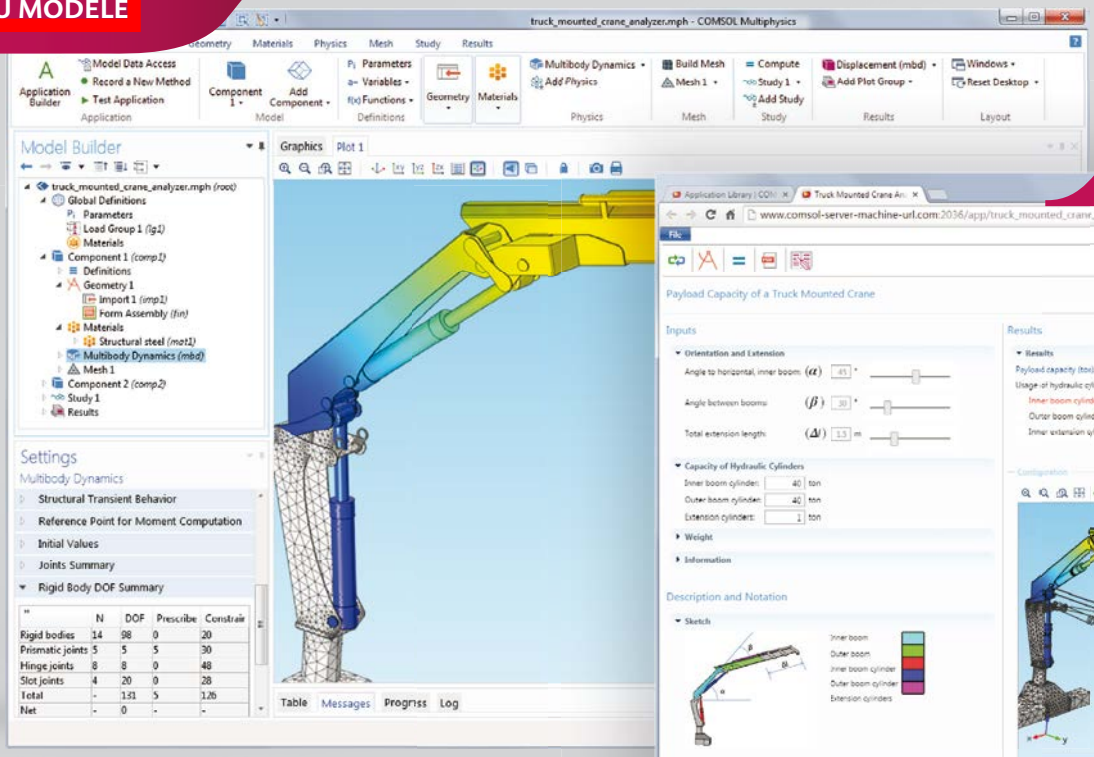
L'enzyme qui révolutionne la génétique

L'ADN est devenu modifiable à volonté

Allemagne : 9,50 € - Belgique : 7,20 € - Canada 7$: 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

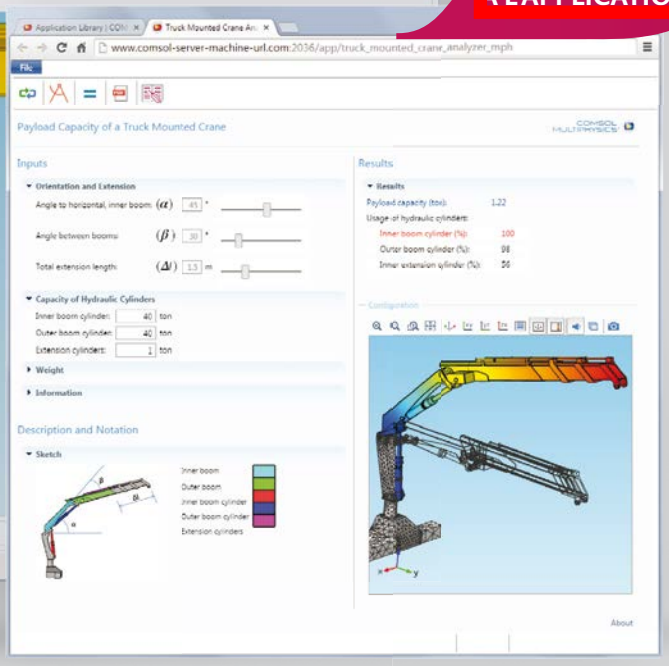
M 02687 - 456 - F: 6,50 € - RD

DU MODÈLE



COMSOL MULTIPHYSICS®

À L'APPLICATION



COMSOL SERVER™

Comment créer le meilleur design et partager votre expertise en simulation ?

GRÂCE À DE PUISSANTS OUTILS DE CALCULS.
AVEC DES APPLICATIONS FACILEMENT PARTAGEABLES.

comsol.fr/5.1

PRODUCT SUITE

COMSOL Multiphysics®
COMSOL Server™

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

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

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

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

MULTIPURPOSE
Optimization Module
Material Library
Particle Tracing Module

INTERFACING
LiveLink™ *for* MATLAB®
LiveLink™ *for* Excel®
CAD Import Module
Design Module
ECAD Import Module
LiveLink™ *for* SOLIDWORKS®
LiveLink™ *for* Inventor®
LiveLink™ *for* AutoCAD®
LiveLink™ *for* Revit®
LiveLink™ *for* PTC® Creo® Parametric™
LiveLink™ *for* PTC® Pro/ENGINEER®
LiveLink™ *for* Solid Edge®
File Import *for* CATIA® V5

© Copyright 2015 COMSOL. COMSOL, COMSOL Multiphysics, Capture the Concept, COMSOL Desktop, COMSOL Server™, and LiveLink are either registered trademarks or trademarks of COMSOL AB. All other trademarks are the property of their respective owners, and COMSOL AB and 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.

COMSOL

POUR LA SCIENCE

www.pourlascience.fr

8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06

Groupe POUR LA SCIENCE
Directrice des rédactions : Cécile Lestienne

Pour la Science
Rédacteur en chef : Maurice Mashaal
Rédactrice en chef adjointe : Marie-Neige Cordonnier
Rédacteurs : François Savatier, Philippe Ribeau-Gésippe, Guillaume Jacquemont, Sean Bailly
Dossier Pour la Science
Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin
Développement numérique : Philippe Ribeau-Gésippe
Directrice artistique : Céline Lapert
Maquette : Pauline Bilbault, Ingrid Leroy, Nathalie Ravier (stagiaire)
Correction et assistance administrative : Maud Bruguière
Marketing : Élise Abib et Ophélie Maillet, assistées de Héloïse Clément (stagiaire)
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 : Aurélien Crida, Gérard Eberl, Vincent Enouf, Sophie Gallé-Soas, Nicolas Georgieff, Évelyne Host-Platret, Jean Le Loeuff, Christophe Pichon, Loïc Villain, Jean-Baptiste Yon

PUBLICITÉ France
Directeur de la publicité : Jean-François Guillotin (jf.guillotin@pourlascience.fr)
Tél. : 01 55 42 84 28 • Fax : 01 43 25 18 29
SERVICE ABONNEMENTS
Nada Mellouk-Raja. Tél. : 01 55 42 84 04
Abonnement en ligne : **http://www.pourlascience.fr**
Courriel : **abonnements@pourlascience.fr**
Service des abonnements - 8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06
Commande de livres ou de magazines :
Pour la Science - 628 avenue du Grain d'Or 41350 Vineuil
DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE
Contact kiosques : À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet
Tel : 04 88 15 12 41
Information/modification de service/réassort : Magazine disponible sur www.direct-editeurs.fr
Canada : Edipresse : 945 avenue Beaumont, Montréal, Québec, H3N 1W3 Canada.
Suisse : Servidis : Chemin des châlets, 1979 Chavannes - 2 - Bogis
Belgique : La Caravelle : 303 rue du Pré-aux-Oies - 1130 Bruxelles.
Autres pays : Éditions Belin : 8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06

SCIENTIFIC AMERICAN Editor in chief : Mariette DiChristina. Executive editor : Fred Guterl. Design director : Michael Mrak. Editors : Ricky Rusting, Philip Yam, Robin Lloyd, Mark Fischetti, Seth Fletcher, Christine Gorman, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong. President : Keith McAllister. Executive Vice President : Michael Florek.

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

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

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

OJD PRESSE PAYANTE Diffusion Certifiée
www.ojd.com

Maurice Mashaal
rédacteur en chef

Le couteau suisse de la génétique

Un nouveau sigle qui semble imprononçable envahit depuis quelque temps le monde de la biologie moléculaire et de la génétique : CRISPR-Cas9. Imprononçable ? On peut dire en français « crispère-casse-neuf ». Ce problème de lecture étant réglé, de quoi s'agit-il ? D'une technique développée grâce à la découverte, en 2007, d'un système de défense des bactéries contre les virus, reposant sur une séquence particulière de leur ADN nommée CRISPR. En 2012, l'équipe de la microbiologiste française Emmanuelle Charpentier et, à Berkeley, celle de Jennifer Doudna se sont inspirées de ce système et ont montré que l'enzyme bactérienne Cas9 permet de couper aisément, avec précision et à l'endroit souhaité, l'ADN de n'importe quelle cellule.

CRISPR-Cas9 : une technique qui, comme d'autres, peut être utilisée à mauvais escient.

Ainsi, comme Emmanuelle Charpentier et le journaliste Pierre Kaldy nous l'expliquent *(voir pages 24 à 32)*, les chercheurs disposent depuis d'un outil puissant et universel grâce auquel ils peuvent modifier à volonté l'ADN, donc les gènes, d'un organisme, et cela en des temps records – quelques semaines là où, avec les méthodes précédentes, plus complexes et moins fiables, il fallait des mois ou plus.

L'enjeu est d'abord scientifique : CRISPR-Cas9, par sa polyvalence et sa facilité, va considérablement accélérer le progrès des connaissances en biologie et en génétique. La technique ouvre aussi de vastes horizons en médecine, en agriculture, en chimie… Mais elle peut être utilisée à mauvais escient (armes biologiques, modifications inconsidérées du vivant, eugénisme, etc.), ce qui appelle, à tout le moins, à des réflexions et débats éthiques *(voir pages 34-35)*. C'est la sempiternelle dualité inhérente à toute innovation technique. ■

sommaire

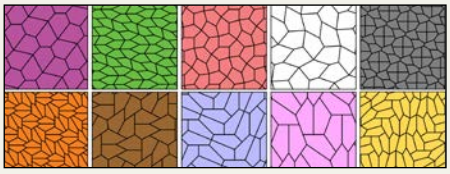
3 Edito

Actualités

5 Pourquoi ne devenons-nous pas tous dépendants ?

7 Des bactéries contre le diabète de type 1

8 Un nouveau pentagone pave le plan



9 La plus ancienne des plantes à fleurs

12 Une piste pour freiner les maladies neurodégénératives

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

14 Point de vue
La compensation écologique, un dispositif encore mal appliqué
Céline Jacob et Fabien Quétier

16 Entretien
Sciences économiques : « Il faut passer à des modèles de troisième génération »
Jean-Philippe Bouchaud

20 Homo sapiens informaticus
La technique, sans les mains
Gilles Dowek

22 Cabinet de curiosités sociologiques
Une rentrée apocalyptique ?
Gérald Bronner

51 Cahier spécial
CEA, 70 ans de recherche et d'innovation
En partenariat avec

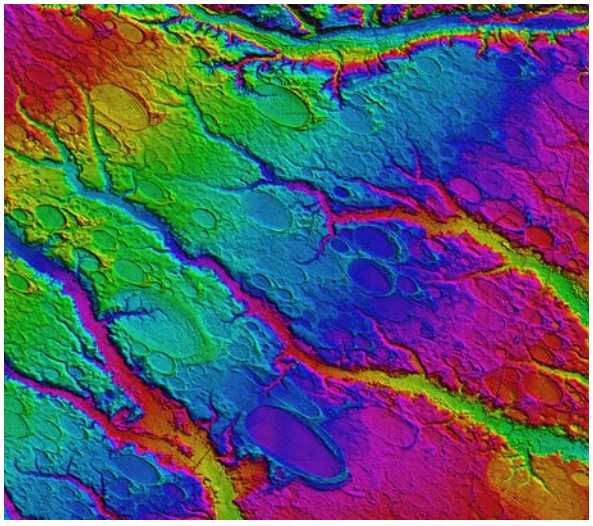
Le numéro comporte un encart d'abonnement *Pour la Science*, inséré en cahier intérieur de toute la diffusion kiosque et posé sur toute la diffusion abonné. 16 500 encarts *Rue des étudiants* sont également posés en 4ème de couverture de la diffusion abonnés France métropolitaine.
En couverture : © Brothers Good/shutterstock.com ; Pour la Science

À LA UNE

24 GÉNÉTIQUE
CRISPR-Cas9, l'outil qui révolutionne la génétique
Emmanuelle Charpentier et Pierre Kaldy
Un système de défense immunitaire bactérien, CRISPR-Cas9, est devenu un outil précis, simple et universel pour modifier les gènes de n'importe quelle cellule à volonté. Un frein majeur de la génétique est levé.

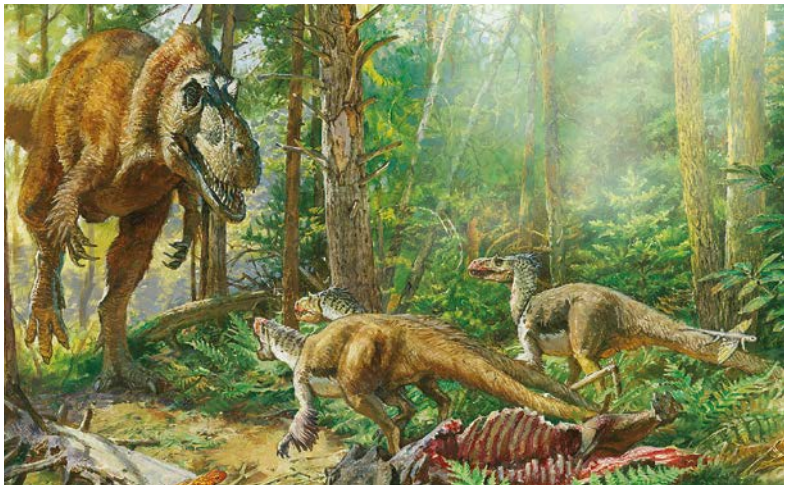
34 **« Une réflexion éthique s'impose »**
Entretien avec Pierre Gaudray
Depuis sa mise au point en 2012, l'outil de génétique CRISPR-Cas9 se répand à une telle vitesse et dans des domaines si variés qu'il soulève de nombreuses inquiétudes.

36 GÉOSCIENCES
De l'hydrogène naturel sous nos pieds
Alain Prinzhofer et Éric Deville
Les géologues ont découvert en plusieurs sites continentaux de par le monde des émissions d'hydrogène en quantités importantes. Une prochaine révolution énergétique se profile-t-elle ?



44 NEUROSCIENCES
L'étonnante plasticité du cerveau adolescent
Jay Giedd
À l'adolescence, le cerveau humain se reconfigure très vite. Ces transformations sont une source de risques, mais aussi d'avancées fulgurantes en matière de cognition et d'adaptabilité.

76 PALÉONTOLOGIE
L'ascension des tyrannosaures
Stephen Brusatte
De nouveaux fossiles révèlent que les tyrannosaures sont passés, en 100 millions d'années, d'un groupe d'animaux de petite taille à la famille de prédateurs géants qui a dominé la fin du Crétacé.



84 ASTROPHYSIQUE
L'horizon des trous noirs brûle-t-il ?
Pour concilier la relativité générale et la physique quantique des trous noirs, certains physiciens ont conclu que l'horizon des événements entourant un tel astre est un « mur de feu » rempli de particules de haute énergie.
Joseph Polchinski

94 HISTOIRE DES SCIENCES
Le daguerréotype qui mesurait la lumière
Jérôme Fatet
Au XIXe siècle, un jeune physicien, Edmond Becquerel, détourne le tout nouveau procédé photographique de Louis Daguerre en un appareil pour analyser la lumière. Il prouve ainsi l'existence des ultraviolets.

Rendez-vous

102 Logique & calcul
Déléguer un calcul sans divulguer ses données
Jean-Paul Delahaye
Vous confiez des calculs à un tiers, il les effectue et vous transmet les résultats, mais sans avoir pu connaître ni les données du calcul ni ses résultats : un miracle cryptographique !

108 Science & fiction
La Force des Jedi, une question de puissance
Roland Lehoucq et J. Sébastien Steyer

110 Art & science
Le mystère de la pastèque blanche
Loïc Mangin

113 Idées de physique
L'escalier chantant de Maoshan
Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

116 Question aux experts
Peut-on contrôler ses rêves ?
Daniel Erlacher

118 Science & gastronomie
Dater du vin sans ouvrir la bouteille
Hervé This

120 A lire

122 Bloc-notes
Les chroniques de Didier Nordon

Toutes les archives
• Pour la Science
• Dossier Pour la Science
depuis 1996
Disponibles sur www.pourlascience.fr*
* Numéros à lire en ligne ou à télécharger au format PDF

Neurobiologie

Pourquoi ne devenons-nous pas tous dépendants ?

Des neurobiologistes ont identifié un mécanisme moléculaire qui freine l'installation d'une addiction – ou la favorise quand il est défectueux.

Certaines substances activent un circuit cérébral qui nous pousse à désirer en consommer à nouveau. Un processus plus ou moins susceptible de s'emballer selon les personnes.

Tout le monde n'est pas égal face à l'addiction : certains parviennent à garder un usage récréatif de la cigarette ou de la drogue, tandis que d'autres ont vite besoin d'enchaîner les prises, même quand cela ne leur procure plus aucun plaisir. La proportion de personnes qui deviennent dépendantes varie selon les « drogues ». Elle est par exemple estimée à 17 % pour la cocaïne et à 32 % pour le tabac, produit le plus addictif. L'équipe de Salah El Mestikawy, du CNRS, a découvert un mécanisme moléculaire qui freine l'installation de la dépendance – et qui peut se dérégler chez certains.

Toutes les drogues ont un point commun : elles augmentent l'action de la dopamine, un neuromodulateur (une substance qui module la communication entre neurones) essentiel pour ressentir un désir. La dopamine est produite par des neurones situés à la base du cerveau et qui la libèrent à de nombreux autres endroits de l'encéphale *via* de longues connexions. Elle vient notamment stimuler l'activité du noyau accumbens, une structure clef du « circuit de la récompense ». Quand il est activé, ce circuit crée une sensation de plaisir et de motivation. Le sujet est ainsi conduit à exécuter à nouveau l'action ayant conduit à cette « récompense ».

Chez les personnes dépendantes, le circuit de la récompense s'emballe et pousse à une consommation compulsive. Or, dans le noyau accumbens, la libération de dopamine est modulée par plusieurs types de neurones. Certains, nommés interneurones cholinergiques, sécrètent deux neurotransmetteurs (molécules qui assurent la communication entre neurones), l'acétylcholine et le glutamate. Le premier augmente la libération de dopamine, tandis que le second l'inhibe. Ce « bilinguisme neuronal » a été découvert par l'équipe de Salah El Mestikawy en 2002.

Les chercheurs soupçonnaient ainsi le glutamate de freiner le développement d'une addiction, en limitant la réactivité du circuit de la récompense. Pour le vérifier, ils ont modifié génétiquement des souris afin d'empêcher le glutamate d'agir. Ils ont rendu dysfonctionnelle une protéine nommée VGLUT3, qui est un transporteur vésiculaire du glutamate – elle permet au neurotransmetteur de s'accumuler dans de petits « sacs » à l'intérieur des neurones, lesquels sont ensuite déversés dans la synapse (jonction entre deux neurones).

Les chercheurs ont ensuite donné aux souris la possibilité de s'injecter de la cocaïne, grâce à un cathéter relié à une seringue qu'elles activaient en donnant un coup de museau dans un endroit particulier de leur cage. La cocaïne augmente l'action de la dopamine en empêchant son évacuation des synapses. Comme attendu, les souris génétiquement modifiées se sont révélées plus vulnérables à l'addiction que des souris normales : elles s'administraient bien plus de drogue et rechutaient plus souvent après un sevrage. En outre, les neurones de leur noyau accumbens ont subi des évolutions morphologiques qui les ont rendus plus sensibles à l'action de la dopamine. Même si l'addiction a d'autres composantes,

elle est caractérisée de façon assez iable par ce type d'observations et l'expériences sur un modèle animal.

Restait à montrer que le méca- nisme existe aussi chez l'homme. Les chercheurs ont alors analysé le gène qui code VGLUT3 chez des oxicomanes ayant développé de nombreuses addictions. Par rapport à des personnes non droguées, ce gène présentait 10 fois plus souvent des mutations. Les personnes ayant un transporteur VGLUT3 dysfonc- tionnel risqueraient donc davan- tage de développer une addiction.

C'est toutefois loin d'être le seul facteur de risque : seuls 5 % des pa- tients polytoxicomanes présentaient une telle mutation. La dépendance peut donc avoir de multiples autres causes. En outre, précise Salah El Mestikawy, « ces mutations ne sont pas forcément une mauvaise chose. Si votre circuit de la récompense, qui assure votre motivation, est particulièrement actif et que vous décidez de faire du sport, de la musique ou des maths, c'est très bien. Cela ne devient néfaste que si vous basculez dans la drogue, la cigarette, les jeux d'argent, etc. ».

Quoi qu'il en soit, ces résultats fournissent une nouvelle piste pour développer des médicaments qui freineraient l'entrée dans l'addic- tion, en empêchant l'emballement du circuit de la récompense. Et même sans substance pharmacolo- gique, insiste Salah El Mestikawy, « il pourrait être d'une grande aide de sensibiliser les jeunes qui ont cette vulnérabilité, en leur expli- quant que ce talon d'Achille – une propension supérieure à tomber dans la dépendance – est aussi une force, à savoir une plus grande aptitude à la motivation ».

Guillaume Jacquemont

D. Y. Sakae et al., Molecular Psychiatry, en ligne le 4 août 2015

Biomédecine

Des bactéries contre le diabète de type 1

Des bactéries de la flore intestinale stimulent la production, dans le pancréas, de molécules qui réfrènent son inflammation, responsable du diabète de type 1. Julien Diana, de l'institut Necker-Enfants Malades (INEM, Unité 1151, Inserm/CNRS/Université Paris-Descartes), qui a dirigé l'étude, nous explique ces résultats et leurs implications.

Quel a été le point de départ de vos travaux ?

Julien Diana : Nous avions montré qu'un peptide antimicrobien nommé CRAMP joue un rôle dans le déclenchement du diabète de type 1. Nous avons voulu savoir si ce peptide avait d'autres rôles dans cette maladie.

Que sont les peptides antimicrobiens ?

J. D. : Ces petites molécules sont produites dans divers organes par des cellules immunitaires, tels les neutrophiles, mais aussi des cellules non immunitaires, telles les cellules épithéliales. Elles permettent de détruire rapidement les micro- organismes pathogènes. Mais il a été montré qu'elles participent aussi à la régula- tion de la réponse immu- nitaire dans des maladies auto-immunes telles que le lupus et le psoriasis. Cela nous a fait penser qu'elles pouvaient influer sur le développement du diabète auto-immun de type 1.

Quelle a été votre démarche ?

J. D. : Nous voulions savoir si des cellules du pancréas, les cellules β, pouvaient pro- duire le peptide CRAMP et ainsi se défendre contre une attaque immunitaire. Nous avons montré, chez la souris et chez l'homme, qu'elles produisent bien le peptide. Et que CRAMP peut inhiber l'activité inflammatoire des cellules immunitaires qui infiltrent le pancréas au cours du diabète. On a bien affaire ici à un mécanisme de protection des cellules β.

Alors que CRAMP participe au déclenchement de la maladie ?

J. D. : Oui. Le peptide a deux rôles ambivalents, on essaye de comprendre pourquoi. Mais ces deux rôles ont lieu à des phases très différentes de la maladie. Le rôle dé- clencheur a été montré chez des souris très jeunes. Des neutrophiles alors présents dans le pancréas produisent le peptide CRAMP, ce qui amorce la maladie. Chez les

Julien Diana, INEM, Inserm U1151, Paris

souris adultes, ce sont des cellules β qui produisent le peptide, lequel devient protecteur.

Quel est le rapport avec la flore intestinale ?

J. D. : Les peptides anti- microbiens sont très étudiés. Les bactériologistes essayent de s'en servir comme alter- native aux antibiotiques. Ils ont ainsi trouvé que les principaux inducteurs de leur production sont des acides gras à chaîne courte produits par des bactéries de la flore intestinale. Nous avons étudié cette possibilité dans notre cas. Chez des souris modifiées qui développent spontanément le diabète de type 1 en vieil- lissant, nous avons montré un défaut de ces acides gras et du peptide CRAMP, dû à une sous-représentation des bactéries de la flore qui les produisent. Des patients atteints de la maladie ont aussi ce défaut.

Est-ce la première fois qu'on montre un effet de la flore sur l'environnement immunitaire du pancréas ?

J. D. : C'est la première fois que l'on montre un mécanisme complet et direct de composés produits par la flore et qui préviennent l'auto-immunité dans le pancréas. Ce pourrait être un mécanisme général de maintien de la tolérance dans les organes périphé- riques. Nous allons lancer des études sur d'autres maladies auto-immunes, telle la sclérose en plaques, et sur d'autres peptides antimicrobiens, pour voir s'il peut être généralisé.

Ces travaux ouvrent-ils des pistes thérapeutiques contre le diabète de type 1 ?

J. D. : On pourrait imaginer une thérapie par transfert de la flore intestinale d'indivi- dus sains. Une alimentation riche en fibres pourrait aussi être bénéfique, car les acides gras à chaîne courte sont le produit de leur fermentation.

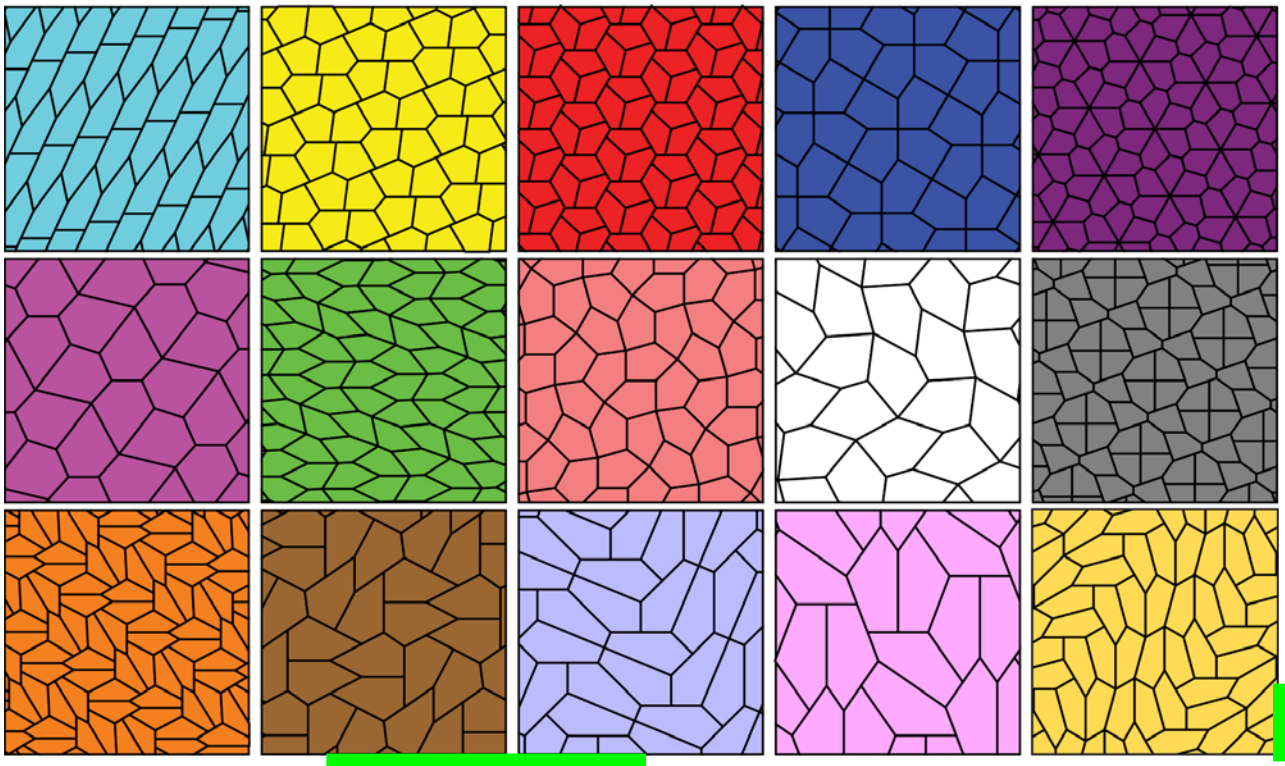
Marie-Neige Cordonnier

J. Sun et al., Immunity, vol. 43, 2015

Mathématiques

Un nouveau pentagone pave le plan

Recouvrir une surface plane avec un motif unique est un problème mathématique ancien et abondamment traité. Mais surprise : une nouvelle solution a été découverte !



Le dernier en date des 15 pavages pentagonaux *(en bas à droite)* a été identifié grâce à un programme informatique.

15 classes de *pentagones convexes irréguliers peuvent paver le plan.*

Vous voulez carreler le sol de votre salle de bains avec des carreaux tous identiques ? Rien de plus simple. Vous pouvez utiliser des carreaux rectangulaires ou encore des tomettes hexagonales. Mais bien d'autres formes sont possibles ! Les mathématiciens cherchent depuis longtemps à recenser tous les motifs qui pavent le plan (infini) sans se chevaucher ni laisser de trous. On sait que n'importe quel triangle ou quadrilatère convient. Trois types d'hexagones convexes fonctionnent également (un polygone est convexe lorsque n'importe quel couple de ses points intérieurs peut être relié par un segment qui reste à l'intérieur). Et tous les polygones convexes ayant plus de six côtés échouent à carreler le sol.

Qu'en est-il des pentagones convexes ? Les chercheurs en connaissaient jusqu'ici 14 types qui pavent le plan, sans parvenir à prouver que cette liste était exhaustive. Et pour cause : une quinzième forme vient d'être découverte par Casey Mann, de l'université de Washington à Bothell, et ses collègues.

Jean-Paul Delahaye avait exposé en 2013, dans sa chronique *Pour la Science* n° 432), une classification des pavages pentagonaux. Le pentagone régulier, aux cinq côtés de même longueur et aux cinq angles égaux, est rapidement écarté. En effet, comme chacun de ses angles mesure 108°, il est impossible d'obtenir 360° en accolant ces pentagones autour d'un sommet.

Cependant, il existe une infinité de pentagones irréguliers susceptibles de paver le plan. En 1918, le mathématicien allemand Karl Reinhardt en découvre cinq classes. Chacune est définie par des relations entre certains angles ou entre les longueurs de certaines arêtes. Trois nouvelles classes sont trouvées en 1968, puis une autre en 1975. Les quatre motifs suivants sont identifiés par une amatrice de mathématiques, Marjorie Rice. Enfin, une quatorzième forme est mise au jour en 1985.

Mais depuis trente ans, aucun autre type de pentagone convexe pavant le plan n'avait été découvert. La liste était-elle complète ? Pour le savoir, l'équipe de Casey Mann a utilisé un programme informatique qui teste de façon exhaustive un ensemble très vaste de configurations pentagonales. Et c'est avec un peu de surprise qu'elle a trouvé cette nouvelle classe de pentagones qui pave le plan *(le dernier en bas à droite ci-dessus)*. Il est encore trop tôt pour dire si d'autres solutions seront débusquées grâce à cette approche informatique, mais la traque aux pentagones est relancée.

Sean Bailly

Actualités

Paléobotanique

La plus ancienne des plantes à fleurs

Le pommier descend-il d'une plante aquatique ? On peut se poser la question : la découverte de la plus ancienne plante à fleurs par une équipe internationale conduite par Bernard Gomez, de l'université de Lyon, conforte l'hypothèse d'une adaptation précoce des plantes à fleurs à la vie aquatique.

Ce chercheur travaille depuis longtemps sur *Montsechia vidalii*, une plante aquatique déconcertante, car on l'avait d'abord classée comme mousse, comme prêle, comme conifère… On l'a découverte au sein de formations calcaires espagnoles datant de 125 à 130 millions d'années, des sédiments de lacs d'eau douce. Pour l'étudier, Bernard Gomez a inventé une technique afin de dégager avec précaution, à l'acide, la plante fossile de sa gangue calcaire. Cela a permis à son équipe d'examiner de près son architecture, sur les fossiles trouvés sur le site de Las Hoyas dans le sud de l'Espagne.

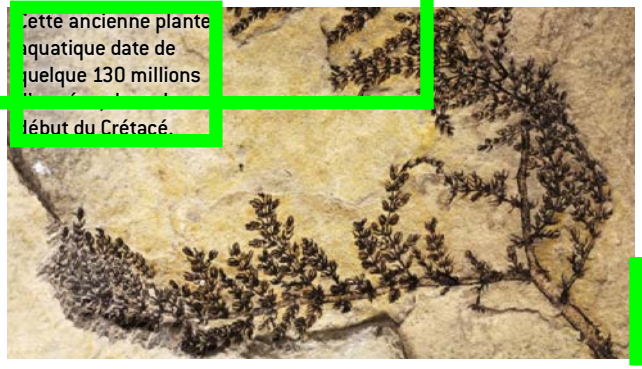
Les chercheurs ont ainsi établi que *Montsechia* existait sous deux formes distinctes, l'une avec des paires de grandes feuilles opposées, disposées à angle droit des autres paires, et l'autre avec des feuilles disposées en spirale, si petites qu'elles sont indécelables à l'œil nu.

C'est sur la seconde forme de *Montsechia* que les chercheurs ont trouvé de nombreux fruits. Ils ont aussi identifié les appareils stomatiques de la plante, c'est-à-dire les dispositifs par lesquels elle réalisait ses échanges gazeux. Or les stomates des plantes à fleurs ne se confondent pas avec ceux des plantes d'autres groupes tels que les gymnospermes (conifères), les fougères, etc. Ainsi, la présence sur *Montsechia* de fruits et de stomates ne laisse plus de doute : il s'agit bien d'une plante angiosperme, la plus ancienne identifiée.

Le fait qu'elle soit aquatique, comme les autres angiospermes légèrement postérieures connues, intrigue. Les plantes à fleurs auraient-elles évolué dans l'eau avant de conquérir les terres ?

François Savatier

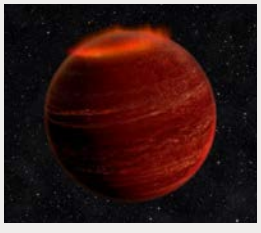
PNAS, en ligne le 17 août 2015



Cette ancienne plante aquatique date de quelque 130 millions d'années, du début du Crétacé.

Aurore sur une naine brune

Une aurore polaire se produit lorsque des particules de haute énergie du vent solaire excitent les molécules de l'atmosphère. L'équipe de Gregg Hallinan, de l'Institut de technologie de Californie, a découvert ce phénomène dans l'atmosphère des naines brunes, des objets astrophysiques à la frontière entre planètes et étoiles. Les chercheurs ont étudié une naine brune située à 20 années-lumière. Cet astre a émis de façon périodique – correspondant à sa période de rotation sur lui-même de 2,8 heures – un signal radio polarisé circulairement, comparable aux émissions des aurores dans l'atmosphère des planètes géantes gazeuses. Il reste à préciser l'origine des particules qui ont déclenché le phénomène, la naine brune n'étant pas proche d'une étoile.



Archéologie

Deux temples de Palmyre détruits à l'explosif

Durant août, Palmyre a perdu une grande figure et deux monuments. Khaled al-Asaad, le directeur des antiquités de Palmyre qui avait passé sa vie à étudier l'oasis caravanière antique, a été exécuté par le groupe Daesh. Par ailleurs, le temple de Baalshamin a été détruit à l'explosif, et celui de Bêl en partie. Quel patrimoine l'humanité vient-elle de perdre ?

L'oasis de Palmyre est déjà évoquée dans les archives de la ville mésopotamienne de Mari au début du IIe millénaire avant notre ère, car elle représente une étape parfaite à mi-chemin entre Méditerranée et Mésopotamie. C'est quand elle est intégrée à l'Empire romain, au début de notre ère, que sa population se sédentarise et construit une ville et des temples de pierre. En araméen, dont un dialecte était parlé à Palmyre, les dieux sont souvent dénommés par le vocable *Ba'al* (Seigneur, Maître) complété par un qualificatif.

Ainsi, *Baalshamin* est le « maître du ciel », en d'autres termes le Dieu des dieux dans le panthéon local de l'époque. Son temple donnait avant tout l'impression d'être un temple romain, c'est-à-dire une colonnade rectangulaire de style corinthien, coiffée d'un toit abritant une *cella* rectangulaire, où demeurait le dieu. Il en est de même pour le temple de Bêl (Bêl est la version mésopotamienne de *Ba'al*). Que dire encore de ce joyau de Palmyre dont la destruction partielle vient d'être confirmée par satellite, sinon la même chose que l'Unesco :

« Le grand temple de Bêl est considéré comme l'un des plus importants monuments religieux du 1er siècle en Orient par sa conception unique. Le traitement de la sculpture et de la gravure de l'arc monumental par lequel on pénètre dans la cité depuis le grand temple est un exemple exceptionnel d'art palmyrénien. »

F. S.

Le temple de Bêl était le plus grand de Palmyre. Il était très bien conservé, parce que les conquérants arabes y avaient érigé une mosquée après avoir envahi l'oasis en 1132.

Record supraconducteur

Certains matériaux, dits supraconducteurs, opposent une résistance nulle à un courant électrique. L'obtention de cet état nécessite un refroidissement à des températures proches du zéro absolu. Divers progrès ont permis la conception de matériaux restant supraconducteurs jusqu'à –110 °C. L'équipe d'Alexander Drozdov, de l'institut Max-Planck de Mayence, en Allemagne, vient de battre un record avec du sulfure d'hydrogène (H_3S) supraconducteur à –70 °C… mais sous une pression 2 millions de fois supérieure à celle de l'atmosphère !

Induire un état totipotent

L'état totipotent est celui des cellules dans les tout premiers stades embryonnaires. De telles cellules sont capables de produire un embryon entier avec le placenta et le cordon ombilical, contrairement aux cellules souches qui peuvent seulement se différencier en divers tissus de l'organisme. Elena Torres-Padilla, de l'université de Strasbourg, et ses collègues ont découvert qu'en inhibant l'expression du complexe protéique CAF1, impliqué dans la structuration de la chromatine, ils induisent un état totipotent dans des cellules souches.

Sentir et cogiter du bulbe

Plutôt fraise-kiwi ou plutôt kiwi-banane, cette odeur ? La distinction de deux fragrances mixtes et proches est compliquée par le fait que les signaux transmis par les neurones sensoriels, dont les terminaisons tapissent la muqueuse nasale, se recoupent partiellement. Olivier Gschwend, de l'université de Genève, et ses collègues ont montré chez la souris que le bulbe olfactif reformate ces signaux pour les rendre plus distincts. Ils ont en outre amélioré les performances des congeurs à un test de discrimination des odeurs en stimulant artificiellement certains neurones de cette région cérébrale.

Astrophysique

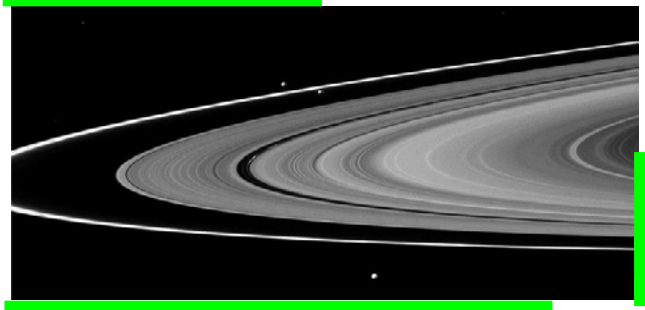
La naissance d'un anneau de Saturne simulée

L'anneau F de Saturne est remarquable par sa structure : large d'à peine une centaine de kilomètres, il est encadré de deux satellites dits bergers, Prométhée et Pandore. Il a été découvert en 1979 par la sonde *Pioneer 11*. Sa formation restait mal comprise. Ryuki Hyodo et Keiji Ohtsuki, de l'université de Kobe, au Japon, ont modélisé numériquement la naissance de cet anneau particulier.

Les chercheurs ont supposé que l'anneau est le résultat de la collision de deux petits satellites. Ces lunes se seraient formées juste au-delà de la limite de Roche, qui marque la frontière où les forces de marée de Saturne ne sont plus assez puissantes pour empêcher l'agglomération de débris en de nouvelles lunes. En supposant que les deux petits satellites étaient composés de 98 % de glace d'eau et de 2 % de roche, comme les constituants des anneaux internes, les chercheurs ont montré que leur collision, si elle était non frontale, a produit des débris ainsi que deux lunes bergères de masse comparable – comme c'est le cas pour Prométhée et Pandore. Dans la simulation numérique, les débris se répartissent selon une bande étroite comprise entre les orbites des deux lunes et deux bandes à l'extérieur qui se dispersent, laissant une structure comparable à l'anneau F.

S. B.

R. Hyodo et K. Ohtsuki, Nature Geoscience, en ligne, 17 août 2015

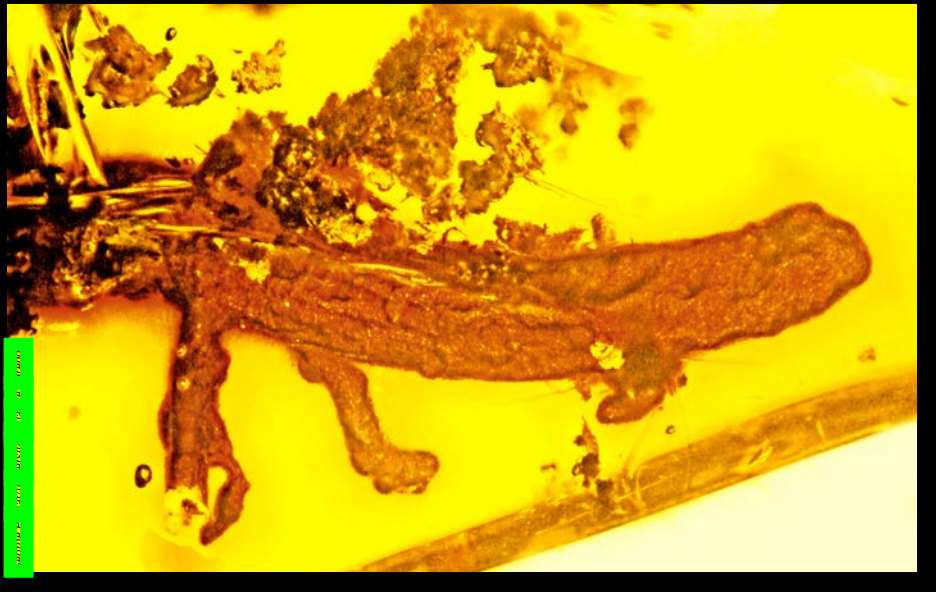


L'anneau F, très fin, est encadré par deux satellites bergers, Prométhée, à l'intérieur de l'orbite, et Pandore, à l'extérieur.

Insolite

Une salamandre figée dans l'ambre

Il y a 20 millions d'années, attaquée par un prédateur, cette salamandre est tombée dans un dépôt résineux, s'y est noyée puis a été fossilisée. George Poinar, de l'université d'État de l'Oregon, est le premier à découvrir un tel animal dans l'ambre. Sa trouvaille étonne aussi par le lieu où elle a été faite, la République dominicaine : on ne connaît aucune espèce de salamandre, actuelle ou fossile, sur l'île, ni même dans toute la région des Caraïbes.



LE MEILLEUR CHEMIN VERS LES ÉTOILES PASSE FORCÉMENT PAR

LA MAISON DE L'ASTRONOMIE

Nouvelle gamme Carbon-Design

de 98 € à 379 €, seulement !

BRESSER

IL N'Y A PAS DE PLUS GRAND ÉCRAN QUE LE CIEL !

INSTRUMENTS ASTRONOMIQUES - JUMELLES - LONGUES-VUES - MICROSCOPES
LOUPES - BASSE-VISION - MÉTÉO - LIBRAIRIE - GLOBES - GADGETS - POSTERS

33 et 35, rue de Rivoli, 75004 Paris
Tél. : 01 42 77 ou 55
nfo@maison-astronomie.com
horaires d'ouverture
du mardi au samedi de 10h15 à 18h30

la maison de l'Astronomie
http://maison-astronomie.com Paris

Actualités

Médecine

Une piste pour freiner les maladies neurodégénératives

Lutter contre l'agrégation anormale des protéines dans le cerveau est aujourd'hui un enjeu de santé publique. Un tel phénomène serait en cause dans plusieurs maladies, notamment celles d'Alzheimer ou de Creutzfeldt-Jakob. Dans cette dernière pathologie, les protéines incriminées sont des prions, c'est-à-dire des agents infectieux susceptibles de causer la maladie chez d'autres individus – les protéines anormales d'Alzheimer « contaminent » aussi les autres protéines du cerveau, qui s'agrègent à leur tour, mais, à l'inverse, ne se propagent pas à d'autres personnes. Une collaboration internationale a réussi à ralentir l'agrégation de prions chez des souris, dont la durée de vie après l'infection a presque été doublée.

Les biologistes ont cherché des molécules qui se lient aux agrégats et les stabilisent, de façon à freiner l'agrégation. Après avoir inoculé des prions dans le cerveau des rongeurs, où ces protéines ont commencé à s'agréger, les chercheurs ont testé toute une variété de composés de la famille des polythiophènes. Certains se sont révélés efficaces et les chercheurs en ont déduit les caractéristiques structurelles permettant une liaison optimale aux agrégats de protéines, caractéristiques précisées ensuite par des simulations et des analyses spectrométriques par résonance magnétique nucléaire.

Ces résultats ont guidé la fabrication de nouveaux polythiophènes, de configuration idéale pour maximiser la force de la liaison. Les molécules synthétisées ont été particulièrement efficaces pour empêcher l'extension et la propagation des agrégats. La durée de vie des souris après l'infection a été prolongée de près de 90 %. En outre, une analyse *post mortem* a révélé que le cerveau des animaux était moins endommagé.

Les polythiophènes sont donc de bons candidats pour traiter les maladies à prions, mais aussi d'autres où les protéines s'agrègent. « Nous pourrions en principe réaliser une étude similaire pour la maladie d'Alzheimer, précise Anja Böckmann, de l'Institut de biologie et de chimie des protéines (CNRS et université de Lyon), qui a participé à l'étude. Et ce d'autant plus que nous avons publié cette année une description de la structure tridimensionnelle des agrégats protéiques impliqués dans cette maladie et que cette structure présente certaines ressemblances avec celle des agrégats formés par les prions. »

G. J.

U. Herrmann et al., Science Translational Medicine, en ligne le 5 août 2015

Virologie

Vers un vaccin universel de la grippe ?

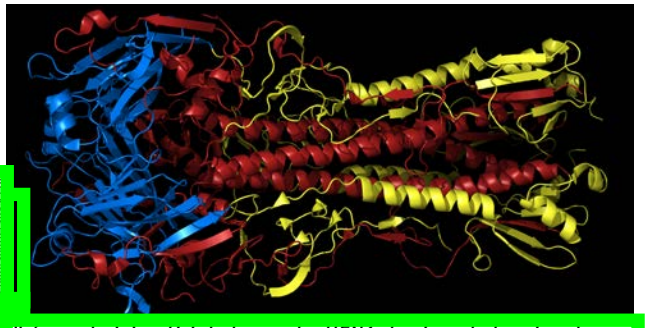
Chaque année, il faut concevoir un nouveau vaccin contre la grippe, car le virus existe sous différentes formes qui sont susceptibles de muter rapidement et de ne plus être reconnues par le système immunitaire. Pour concevoir un vaccin, on utilise les souches du virus des années précédentes en espérant que le virus de celle qui vient ne sera pas trop différent. Dès lors, le vaccin est plus ou moins efficace selon les années. Pour remédier à ce problème, Barney Graham, du Centre de recherche de vaccination, à Bethesda aux États-Unis, et son équipe ont étudié la possibilité d'un vaccin universel qui fonctionnerait malgré les mutations.

Le vaccin contre la grippe est conçu à partir de souches désactivées du virus afin de déclencher la production par l'organisme d'anticorps. Ces derniers ciblent l'hémagglutinine, une protéine située sur l'enveloppe du virus. Le vaccin de l'équipe de Barney Graham est lui constitué de nanoparticules sur lesquelles est fixée de l'hémagglutinine du virus H1N1, mais seulement la « tige » de la protéine, moins sujette aux variations que sa « tête ».

L'équipe a montré que des souris ainsi vaccinées survivaient aussi à des doses létales de la souche virale H5N1. Une autre étude, utilisant une approche voisine, a donné des signes encourageants. Mais si les chercheurs ont montré que le principe de vaccin universel antigrippal est possible, il reste à adapter cette technique au système immunitaire de l'homme.

S. B.

H. M Yassine et al., Nature Medicine, en ligne, 24 août 2015; A. Impagliazzo et al., Science express, en ligne, 24 août 2015



L'hémagglutinine *(ici de la souche H5N1 du virus de la grippe)* mute fréquemment, ce qui rend difficile la mise au point d'un vaccin. De nouvelles approches ciblent sa partie la plus stable, la tige *(en jaune)*.

À l'abri sous l'œil de l'épervier

Les œufs du colibri à gorge noire sont souvent au menu du geai mexicain. Harold Greeney, de l'université de l'Arizona, et ses collègues se sont intéressés au choix du lieu de nidification du colibri, qui réduit parfois cette menace. Sur 342 nids observés dans l'Arizona, 80 % sont installés à proximité du repaire d'un épervier de Cooper. La présence de ce prédateur du geai dissuade ce dernier de s'approcher des nids des colibris, ce qui améliore le succès reproductif de l'oiseau-mouche.

Obésité et cancer du sein

Des facteurs hormonaux sont souvent évoqués pour expliquer que l'obésité augmente les risques de cancer du sein chez la femme. Bo Ri Seo, de l'université Cornell, et ses collègues ont étudié une piste alternative : une modification des propriétés physiques du milieu extracellulaire déclencherait les signaux chimiques menant à la formation de tumeurs. Cette hypothèse pourrait être pertinente chez les souris obèses, car les chercheurs ont montré que leurs tissus adipeux sont plus rigides, en raison d'une concentration plus importante de certaines cellules de structure dans les tissus adipeux, des myofibroblastes.

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

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

SigmaPlot 13

Exact Graphs and Data Analysis

Le chemin le plus simple de l'analyse à la création de graphes

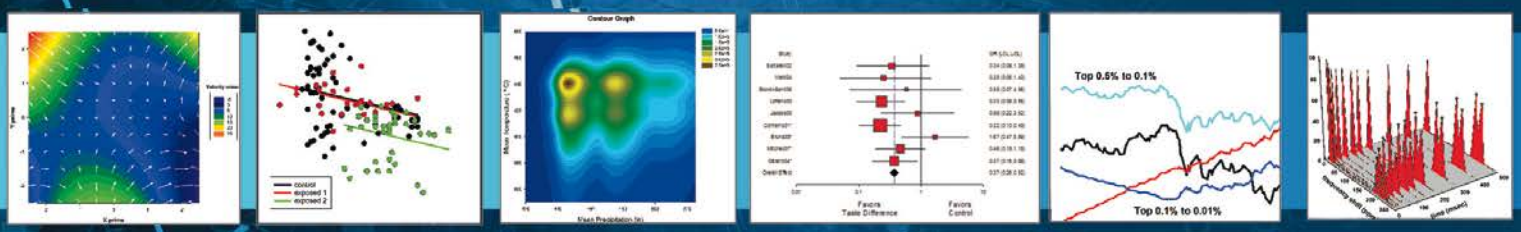
Appliquez un large choix de modèles graphique

Analysez vos données en toute simplicité

Ajustez facilement vos données

Publiez vos graphiques où vous voulez

Utilisez SigmaPlot depuis Exce



www.ritme.com

RITME - 34, bd Haussmann
75009 Paris - France
Tél. : +33 (0) 1 42 46 00 42

RITME SCIENTIFIC SOLUTIONS

Distributeur officiel en France, Suisse, Belgique et au Luxembourg

POINT DE VUE

La compensation écologique, un dispositif encore mal appliqué

Préserver la biodiversité en imposant aux projets d'aménagement de compenser en nature leurs impacts environnementaux négatifs : un bon principe, mais difficile à mettre en œuvre.

Céline JACOB et Fabien QUÉTIER

En résumant de façon lapidaire, la compensation écologique est la démarche consistant à créer, protéger ou restaurer un habitat naturel pour compenser la destruction d'un autre milieu naturel. En théorie, c'est un outil intéressant pour réduire, voire éviter, la dégradation de l'environnement et réparer les dommages qu'il peut subir. C'est une illustration du principe « pollueur-payeur ». Cependant, sa mise en œuvre se heurte à de nombreuses difficultés, voire à des détournements (comme celui consistant à protéger un milieu dont la préservation était déjà programmée dans un cadre plus vaste, national ou international). Pour remplir correctement sa fonction, la compensation écologique nécessite des solutions techniques efficaces et un appareil réglementaire et organisationnel adéquat. Il reste des progrès à faire...

En France, la compensation écologique est l'un des sujets clefs du projet de loi sur la biodiversité actuellement en discussion au Parlement. La loi compléterait la réglementation française en matière d'atténuation et de compensation des impacts environnementaux des projets d'aménagement – laquelle repose sur la loi de 1976 sur la protection de la nature et ses évolutions ultérieures, dont les apports du Grenelle de l'environnement (2007).

Le Code de l'environnement a défini la compensation comme des mesures ayant pour objet d'apporter « une contrepartie aux effets négatifs notables, directs ou indirects, d'un projet qui n'ont pu être évités ou suffisamment réduits ». On parle de séquence « éviter-réduire-compenser », ERC en abrégé. En principe, la compensation en est l'étape ultime : elle porte uniquement sur les impacts résiduels significatifs et ne doit pas constituer un droit à détruire.

Les mesures compensatoires ont pour objectif de « conserver globalement et, si possible, améliorer la qualité environnementale des milieux ». Il s'agit d'intervenir sur des actions écologiques telles que la restauration, la réhabilitation ou la re-création de milieux, leur préservation ou leur mise en valeur. Ces mesures peuvent viser les milieux eux-mêmes, certaines de leurs fonctionnalités, ou des espèces animales ou végétales liées à ces milieux, selon les impacts à compenser.

En France, les exigences de compensation écologique restent hétérogènes, peu lisibles et mal appliquées.

On peut rapprocher cette définition de celle proposée par le BBOP (*Business and Biodiversity Offsets Programme*), une plateforme internationale créée en 2004 et regroupant notamment des industriels, des banques et des ONG de conservation de la nature. Pour le BBOP, la compensation écologique doit conduire à l'absence de perte nette de biodiversité, voire à un gain net. Cette exigence est aussi celle de banques comme la Société financière internationale (filiale de la Banque mondiale) et des banques privées ayant souscrit aux principes dits « de l'Équateur ».

Par exemple, des projets miniers à Madagascar ont compensé leurs impacts sur des forêts naturelles essentielles pour certaines espèces menacées (notamment des lémuriens ou des batraciens) en finançant des actions de restauration de forêts dégradées et en protégeant des forêts contre l'expansion des cultures sur abattis-brûlis.

Cependant, la biodiversité ne se limite pas à des listes d'espèces : pour être efficace, la compensation doit prendre en compte l'ensemble des interactions et des fonctions qui constituent les écosystèmes. Par exemple, il faut que le choix des forêts à protéger tienne aussi compte des corridors de déplacement de la faune entre massifs forestiers.

Le principe d'absence de perte nette impose que les mesures prises soient suffisantes pour compenser intégralement les impacts résiduels des projets. Mais pour évaluer les « pertes » à compenser et les « gains » apportés par la compensation, on doit disposer d'indicateurs précis, fiables et objectifs, à coût raisonnable. C'est une équation parfois difficile à résoudre. Par ailleurs, pour démontrer l'« additionnalité » des mesures (leur gain écologique), ces évaluations doivent aussi se faire en comparaison avec le scénario hypothétique

où il n'y aurait pas de projet d'aménagement ou de mesures de compensation.

Aux États-Unis, l'objectif d'absence de perte nette a été adopté en 1989 pour faire face à la disparition rapide des zones humides. Cela s'est traduit par le développement de méthodes d'évaluation de l'équivalence écologique entre les zones humides perturbées par des aménagements et celles restaurées en compensation, la clarification progressive des responsabilités dans la mise en œuvre des mesures, l'émergence de dispositifs de financement assurant la protection à long terme des zones humides restaurées, etc.

Aujourd'hui, les États-Unis privilégient des solutions intégrées de compensation où une grande zone humide est restaurée par un opérateur spécialisé, lequel vend ensuite la compensation à de multiples porteurs de projets, avant même que leurs impacts soient effectifs. Ce système est qualifié de « banque de compensation ».

La France expérimente cette solution depuis 2008, lorsqu'a débuté la re-création par CDC Biodiversité (une filiale de la Caisse des dépôts et consignations) de plus de 300 hectares d'habitat pour l'avifaune steppique sur le site de Cossure, dans les Bouches-du-Rhône.

En dehors de ce type d'expérimentation, il n'existe pas en France et dans de nombreux autres pays d'offre de compensation. Les aménageurs doivent alors définir leurs compensations au cas par cas et trouver les terrains et les partenaires nécessaires pour les mettre en œuvre. Or généraliser ce traitement dispersé des impacts au cas par cas conduit à multiplier les intervenants à l'échelle d'un même territoire et à diluer les responsabilités sur l'efficacité du dispositif ERC, tout en générant des coûts importants, notamment pour les services de l'État en charge du contrôle des mesures compensatoires. Dans ce contexte, il est urgent de trouver des solutions techniques et organisationnelles permettant d'appliquer effectivement et efficacement la séquence ERC.

La compensation est un outil de plus à notre disposition pour traiter nos impacts sur la biodiversité, mais que l'on doit manier avec précaution. Elle peut être utilisée à tort pour justifier des projets dont les impacts résiduels constituent un risque inacceptable pour la biodiversité. Mais une opposition de principe

L'EXPLOITATION D'UNE CARRIÈRE À CIEL OUVERT, comme ici dans le massif du Taunus, en Allemagne, a inévitablement des impacts environnementaux négatifs. Ces derniers doivent être compensés par des gains environnementaux au moins équivalents. La réglementation l'exige et les méthodologies existent, mais en a-t-on les moyens et la volonté ?

à la compensation pourrait aussi conduire à maintenir un *statu quo* tout aussi inacceptable : des projets d'aménagement qui ne compensent pas ou mal leurs impacts et contribuent à l'érosion du patrimoine naturel.

Quels que soient les systèmes mis en place, les pouvoirs publics ont un rôle clef à jouer en garantissant la bonne application de la séquence ERC. En particulier, ce sont eux qui déterminent si les impacts résiduels (avant compensation) sont acceptables ou non, fixent les règles de son application et contrôlent le respect des engagements des aménageurs. Malgré les ambitions affichées en 2012 dans la doctrine ERC du ministère de l'Écologie, les exigences concernant l'équivalence écologique (approche pertes-gains, additionnalité, etc.) et la pérennité des mesures (durées d'engagement, maîtrise foncière, garanties financières, etc.) restent très hétérogènes, peu lisibles et souvent mal appliquées. Ces choix reflètent nos priorités dans les arbitrages entre développement économique et conservation de la biodiversité, qu'on ne peut pas toujours concilier. Il faut de la volonté politique pour s'emparer de la séquence ERC et en faire un outil performant. ■

LES AUTEURS

Céline JACOB est doctorante au Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive, à Montpellier, et chez Créocéan, société de services et conseils en océanographie.

Fabien QUÉTIER est écologue et directeur d'études chez Biotope, à Mèze.

BIBLIOGRAPHIE

H. Levrel *et al.*, **Restaurer la nature pour atténuer les impacts du développement. Analyse des mesures compensatoires pour la biodiversité.** Quæ, 2015.

M. Maron *et al.*, **Stop misuse of biodiversity offsets,** *Nature*, vol. 523, pp. 401-403, 2015.

Réagissez au Point de vue sur www.pourlascience.fr

ENTRETIEN

Sciences économiques : « Il faut passer à des modèles de troisième génération »

Les spécialistes de l'économie et de la finance ne parviennent pas à prévoir les crises et ne s'entendent pas sur les moyens de les juguler. Selon l'économiste Jean-Philippe Bouchaud, leurs modèles sont mal fondés.

Jean-Philippe BOUCHAUD est professeur de physique à l'École polytechnique et président de Capital Fund Management.

En écoutant des débats entre experts, tout un chacun peut constater la relative impuissance des sciences économiques à décrire et comprendre de façon indiscutable la réalité économique et financière, et notamment les crises. Comment progresser ? Physicien de formation, Jean-Philippe Bouchaud milite pour les « modèles fondés sur les agents », où le comportement réel des agents économiques est pris en compte.

POUR LA SCIENCE
Qu'est-ce qu'un modèle économique ou financier ? À quoi servent de tels modèles ?

JEAN-PHILIPPE BOUCHAUD : Comme dans d'autres domaines de la science, un modèle financier ou économique est un ensemble d'hypothèses et de relations censé décrire quantitativement le phénomène (financier ou économique) auquel on s'intéresse. Un modèle se présente alors sous la forme d'un ensemble d'équations que l'on analyse ou dont on détermine les solutions soit mathématiquement (on dit « analytiquement ») quand c'est possible, soit numériquement, à l'aide d'un ordinateur, sinon.

Les modèles financiers ou économiques servent à maintes choses : calculer des risques, fixer le prix de produits financiers de plus en plus complexes, comprendre comment les transactions sur une matière première vont faire varier son prix, déterminer comment les banques centrales doivent réagir face à de l'inflation ou du chômage, etc. Ils sont au cœur de la gestion du monde économique et financier.

PLS
Existe-t-il des modèles universels, utilisés par tous, ou bien chacun a-t-il le sien ?

J.-P. B. : Dans les décennies 1980 et 1990, tous les modèles financiers utilisés, malgré de petites variantes, se fondaient sur des lois statistiques gaussiennes. C'était ainsi le règne du modèle de Black-Scholes-Merton, conçu vers 1973 et qui suppose que le prix d'un actif financier fluctue de la même façon que le mouvement brownien (mouvement erratique d'une particule microscopique dû aux collisions avec les molécules du milieu).

En macro-économie, tous les modèles sont fondés sur la théorie de l'équilibre général qui suppose notamment que les agents économiques (individus, entreprises, etc.) se comportent rationnellement de façon à maximiser leurs profits et que le marché est « efficient », c'est-à-dire que les prix reflètent fidèlement toute l'information disponible sur les actifs sous-jacents.

Tous ces modèles « de première génération » ont montré leurs limitations, notamment avec le grand krach boursier de 1987 et la crise de 2008. En particulier, les lois gaussiennes se sont révélées inadaptées : elles attribuent une probabilité quasi nulle aux fluctuations de forte amplitude, alors que dans la réalité cette probabilité n'est pas du tout négligeable. Depuis, la recherche s'est orientée vers des modèles de deuxième génération. Ils ont le défaut d'être fondés sur les mêmes principes que les premiers, mais ils intègrent des paramètres supplémentaires que l'on peut calibrer de façon à ce qu'ils s'ajustent au mieux aux données réelles disponibles.

PLS
En quoi ces modèles de deuxième génération sont-ils inadéquats ?

J.-P. B. : Comme ceux de première génération, ce sont des modèles conçus de façon *ad hoc*, choisis surtout parce qu'ils sont mathématiquement traitables et esthétiques, même quand on est conscient qu'ils reposent sur des hypothèses peu réalistes : le marché réel n'est pas efficient, les agents économiques sont loin d'être toujours rationnels, etc. Les modèles économiques ne prévoient pas de crises spontanées ; les crises

sont alors censées se produire uniquement sous l'effet d'événements externes suffisamment importants. Quant aux modèles financiers, ils laissent la place à un calibrage permettant de rendre compte d'une crise, mais ils ne présentent pas de mécanisme interne susceptible de faire émerger une telle situation : là encore, la crise est considérée comme exogène et non endogène, contrairement à ce que l'on constate dans la réalité.

Au mieux, certains de ces modèles sont capables de reproduire un nombre plus ou moins important de phénomènes observés. C'est le cas des modèles de type multifractal, dont Benoît Mandelbrot a été un précurseur. Mais ils ne fournissent qu'une description phénoménologique, pas une compréhension des mécanismes sous-jacents.

PLS

Que faudrait-il faire pour élaborer de meilleurs modèles ?

J.-P. B. : Il faut passer à des modèles de troisième génération, qui ne soient pas postulés *ex nihilo* mais où ce que les agents économiques font réellement est pris en compte à la plus petite échelle. Pour obtenir des modèles réalistes et offrant une compréhension des phénomènes économiques ou financiers, on doit partir de l'échelle microscopique et aller vers l'échelle macroscopique. Une telle démarche est très naturelle en physique où, par exemple, la transition brutale entre un état aimanté de la matière et un état non aimanté s'explique à partir du comportement statistique de chacun des aimants atomiques et de leurs interactions.

De tels modèles fondés sur les agents permettraient d'identifier les mécanismes en jeu, de comprendre qualitativement les valeurs des paramètres pertinents à l'échelle macro-économique ainsi que les façons dont une crise peut survenir.

PLS

Le fait que le comportement des agents économiques ne soit pas forcément rationnel a été souligné depuis longtemps. Pourquoi n'est-il toujours pas pris en compte ?

J.-P. B. : L'attitude des économistes vis-à-vis de cela et des autres lacunes de la modélisation est assez curieuse. Individuellement, chacun admet que la modélisation actuelle a de graves défauts ; mais collectivement, la communauté des spécialistes reste très conservatrice et continue à suivre son approche traditionnelle, qui met plus l'accent sur de belles mathématiques que sur l'adéquation à la réalité.

PLS

Cela ne s'expliquerait-il pas par la difficulté technique à modéliser selon une approche micro-macro ?

J.-P. B. : Effectivement, c'est plus difficile. Quand on part de l'échelle microscopique, qui implique un grand nombre d'agents individuels en interaction, en vue de reproduire ou d'analyser un phénomène macroscopique, on ne sait généralement plus le faire de façon analytique, avec de jolies mathématiques. Mais il est possible de faire des simulations numériques. Elles constituent une sorte d'expérimentation très utile, permettant de travailler sur un grand nombre de données qui portent sur des échelles de temps très variées, allant de la milliseconde à l'année et plus. En effectuant des allers et retours entre simulations, analyse des données, calculs analytiques et modélisation, on arrive à avancer. En physique, on a l'habitude des « expériences numériques » depuis au moins les années 1980 (les premières simulations numériques datent de la Seconde Guerre mondiale).

PLS

Et en économie ou en finance ?

J.-P. B. : Ce n'est pas du tout le cas. La pratique des simulations numériques y est encore très marginale. Dans ces domaines, il n'y a qu'une dizaine d'équipes dans le monde qui font de la simulation numérique avec des modèles fondés sur les agents. Comme l'ont souligné en 2009 J. Doyne Farmer et Duncan Foley, économistes à Oxford et à l'institut Santa Fe aux États-Unis, les budgets correspondants sont de l'ordre de quelques millions d'euros, alors que ceux qui ont été mobilisés depuis les années 1950 pour simuler les conditions météorologiques se chiffrent en milliards ! On ne peut pourtant pas dire que l'économie est un domaine moins important que le temps qu'il fera demain…

LA STATISTIQUE DES FLUCTUATIONS DES COURS est en général décrite par des modèles qui sous-estiment la probabilité des événements rares, ou qui ne font que s'ajuster aux données sans pouvoir expliquer les mécanismes qui les produisent. Pour y remédier, les économophysiciens élaborent des modèles fondés sur le comportement réel d'agents économiques en interaction.

Cela explique en partie pourquoi les travaux relatifs aux modèles fondés sur les agents sont très peu représentés dans les revues professionnelles d'économie les plus en vue. Une autre raison est que cette approche fondée sur les agents n'est pas dans la culture dominante du milieu des économistes, lesquels rechignent donc à publier des études qui en relèvent. Moi-même, par exemple, je n'ai jamais réussi à publier un article dans ces revues.

Mais les choses devraient changer dans le bon sens d'ici quelques années, notamment sous l'impulsion des jeunes étudiants en économie.

dont une partie pousse à la rénovation de leurs enseignements, en particulier pour y inclure la simulation numérique.

PLS

Des modèles plus réalistes empêcheraient-ils des crises financières ou économiques de survenir ?

J.-P. B. : D'une part, il faut avoir conscience que les réglementations comptables, par exemple celle sur la valorisation des portefeuilles, sont calées sur les modèles actuels, qui ne prennent pas en compte les effets de rétroaction. Ainsi, quand le prix des actifs baisse, la valeur du portefeuille diminue, ce qui incite à la vente des actifs, d'où une baisse supplémentaire des prix, et ainsi de suite. On a là un mécanisme d'instabilité qui explique en partie la crise de 2008 et contre lequel la réglementation ne prévoit pas de parades. Si les modèles étaient plus réalistes, les réglementations seraient mieux adaptées… D'autre part, les modèles actuels, en attribuant aux crises des causes exogènes et en supposant qu'il y a toujours retour spontané vers l'équilibre, sont tellement tranquillisants qu'ils font baisser la garde. Avec de meilleurs modèles, prenant en compte la possibilité de crises endogènes, le secteur économique et financier serait plus prudent. De toute façon, ça ne pourra pas être pire que maintenant.

PLS

Dans quelle mesure les modèles influent-ils sur le marché ?

J.-P. B. : Il est clair que les modèles influent sur le marché puisque, comme je l'ai expliqué, les réglementations (et, plus largement, la politique économique) en dépendent. Par exemple, les modèles classiques utilisés par les banques centrales pour déterminer leurs taux directeurs prédisent qu'une banque centrale doit réagir fortement à une fluctuation de l'inflation ou du taux de chômage. Or avec un modèle simplifié fondé sur les agents, nos simulations ont montré au contraire qu'une surréaction déstabilise l'économie ! Un autre exemple est le krach de 1987, pour lequel il est aujourd'hui clair qu'il a été provoqué par une rétroaction du modèle de Black-Scholes-Merton sur les cours. L'un des principaux objectifs de la recherche actuelle en économie et en finance est de comprendre les rétroactions, qu'elles soient ou non dues aux modèles.

PLS

Quelle place ont les « économophysiciens » comme vous dans le monde financier et économique ?

J.-P. B. : Les physiciens qui font des recherches économiques ou financières sont encore peu nombreux, bien que ce soit difficile à quantifier. Mais surtout, leur place dans ces domaines est marginale. En partie pour des raisons institutionnelles, puisque ces chercheurs sont à la frontière entre deux disciplines bien établies, et que l'interdisciplinarité, en théorie souhaitée par les institutions, est peu établie dans les faits. Et il y a des obstacles d'ordre psychologique, la démarche des physiciens étant très différente. Au lieu de calibrer des modèles sur les données disponibles, comme le font les économistes et ce qu'il est toujours possible de faire (« Avec suffisamment de paramètres, on peut modéliser un éléphant »), les physiciens sont bien entraînés à examiner des données et à les analyser sans *a priori* sur les outils requis. En d'autres termes, le physicien accorde la primauté aux données d'observation, alors que l'économiste préfère souvent un modèle préconçu. De plus, le physicien est habitué à essayer de comprendre un système macroscopique à partir d'une analyse de ses constituants microscopiques, ce qui n'est pas dans la culture de l'économiste.

Le physicien accorde la primauté aux données, alors que l'économiste préfère souvent un modèle préconçu.

PLS

Après la crise financière de 2008, certains, par exemple l'ancien Premier ministre Michel Rocard, ont publiquement pointé du doigt les mathématiques financières. Trouvez-vous cela justifié ?

J.-P. B. : Les spécialistes de mathématiques financières ont contribué à la crise, mais marginalement. De façon générale, on ne se préoccupait ni des données d'observation ni des impacts des modèles. Vendre des produits financiers « toxiques » en croyant qu'ils sont peu risqués, c'était une conséquence des modèles rassurants qui constituaient la norme à cette époque. Il faut plus d'esprit critique vis-à-vis des modèles utilisés, et en cela les experts de mathématiques financières ont une responsabilité. Mais ils ne sont pas du tout les seuls, loin de là.

PLS

Il y a quelques années, les médias ont relayé de vives critiques contre le caractère trop mathématique de l'école française d'économie. Qu'en pensez-vous ?

J.-P. B. : De ce point de vue, l'école française d'économie n'est pas du tout la pire, comme l'illustrent des contre-exemples tels que Thomas Piketty ou Esther Duflo. En fait, c'est l'école mondiale d'économie qui est trop mathématisée et axiomatisée, la pire étant celle de Chicago, laquelle a tenu le haut du pavé depuis 50 ans. Par ailleurs, les critiques ne sont pas spécifiques à l'école française : ainsi, à l'université de Manchester, en Grande-Bretagne, un mouvement étudiant, « The Post-Crash Economics Society », tente d'y faire rénover l'enseignement des sciences économiques, accusé d'orthodoxie et de formalisme outrancier, sans lien avec les données du monde réel.

PLS

Le formalisme des sciences économiques n'occulte-t-il pas les présupposés politiques ou idéologiques des économistes eux-mêmes ?

J.-P. B. : Si, certainement. Il y a d'ailleurs une coïncidence très frappante entre la période de la guerre froide et celle où s'est développée la théorie des marchés efficients. L'école de Chicago s'est épanouie à cette époque et le contexte de guerre froide a probablement joué un rôle. L'antagonisme entre les pays occidentaux, à économie libérale, et les pays communistes, à économie dirigiste, a influencé, inconsciemment ou non, les économistes américains. Plus largement, les présupposés idéologiques font que les spécialistes conçoivent souvent leurs modèles en fonction de ce qu'ils veulent démontrer, et non à partir d'une analyse aussi impartiale que possible de la réalité. ■

Propos recueillis par Maurice MASHAAL

GRENOBLE SCIENCES

■ CONSEIL ■ EXPERTISE ■ LABELLISATION ■ ÉDITION

■ **Le “couteau suisse” pour réaliser des applications concrètes en biochimie**

Nouvelle édition avec site web compagnon

pap-ebook
LIVRE + SITE WEB

■ **... et d'autres titres de la collection *Grenoble Sciences***

www.grenoble-sciences.fr

■ GRENOBLE SCIENCES

POUR COMMANDER : les ouvrages en français sont en vente dans le rayon *Sciences* des librairies ou sur internet : *laboutique.edpsciences.fr*

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

Université Joseph Fourier GRENOBLE

Région RhôneAlpes

HOMO SAPIENS INFORMATICUS chronique de Gilles Dowek

La technique, sans les mains

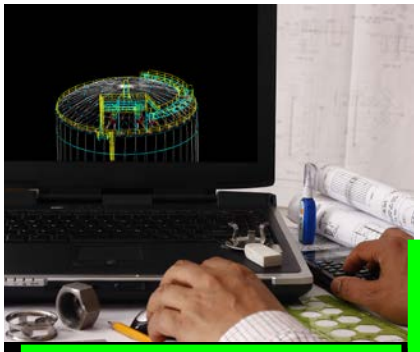
Les activités techniques faisant de plus en plus appel à des objets informatiques, l'habileté d'un technicien devient conceptuelle plutôt que manuelle.

Les démarches scientifique et technique se distinguent habituellement par leur finalité : la première cherche à établir que des propositions sont vraies, la seconde à fabriquer des objets. Cette différence de finalité induit, par exemple, une différence dans la valorisation des résultats négatifs.

Ainsi, quand un mathématicien découvre qu'il est impossible de construire, à la règle et au compas, un disque et un carré de même aire (impossibilité de la quadrature du cercle, Ferdinand von Lindemann, 1882), nous considérons qu'il s'agit d'une grande avancée de la science. Si, en revanche, un luthier découvrait qu'il est impossible de fabriquer un violoncelle avec de la ficelle et du papier, loin de considérer cette découverte comme une grande avancée de la technique, nous lui demanderions plutôt quels matériaux il compte alors utiliser à la place.

Les qualités que, traditionnellement, nous associons à ces démarches sont aussi très différentes : un bon scientifique doit avoir une grande habileté conceptuelle, car la science est constituée de concepts abstraits. Un bon technicien, en revanche, doit avoir une grande habileté manuelle, car c'est avec sa main qu'un luthier fabrique un violon, un orfèvre un bijou, un potier une amphore. Cette association entre la main et la technique nous semble si évidente que, parmi les cours dispensés au collège, a un temps figuré un cours d'« Éducation manuelle et technique ». Elle repose cependant sur un présupposé : que les objets techniques sont des objets matériels.

L'informatique est à la fois une science et une technique, car les informaticiens établissent que certaines propositions sont vraies, par exemple qu'il n'existe pas d'algorithme de tri en temps linéaire, et fabriquent aussi des objets, par exemple des programmes. Cependant, contrairement aux violons, aux bijoux et aux amphores, les programmes ne sont pas des objets maté-



LA CONCEPTION, LA FABRICATION et l'utilisation des objets se font aujourd'hui souvent au moyen de logiciels.

riels, et leur fabrication ne demande donc pas d'habileté manuelle. Elle nécessite, en revanche, une certaine habileté conceptuelle, pour exprimer des algorithmes dans des langages de programmation, structurer, abstraire, traduire, etc.

Toutefois, comme de plus en plus d'activités techniques font intervenir un objet informatique, cette évolution des compétences techniques concerne aussi la fabrication d'objets matériels. Une certaine habileté manuelle était nécessaire pour souder des transistors sur un circuit imprimé ou pour fabriquer une pièce de métal avec une forge. Elle n'est plus si utile pour fabriquer un circuit intégré rassemblant un milliard de transistors ou une pièce de métal usinée avec une machine-outil à commande numérique. Fabriquer ces objets demande désormais surtout une grande habileté conceptuelle, pour spécifier le circuit intégré dans un langage de description de matériel ou pour commander la machine-outil dans un langage de programmation adapté.

Cette évolution des compétences techniques, induite par l'évolution des techniques elles-mêmes, cette dissociation de la main et de la technique, perturbe nos repères plus qu'il ne paraît. La science était associée au langage, au concept, à l'abstrait ; la technique était associée à la main, au geste, au concret. Désormais, ces activités exigent avant tout, l'une comme l'autre, de l'habileté conceptuelle. Nos hiérarchies sociales valorisaient la science davantage que la technique, mais nous voyons désormais apparaître des techniciens qui ont fait dix ans d'études et gagnent des milliards en valorisant une idée abstraite. Les scientifiques portaient un costume de ville, les techniciens un bleu de travail. Leurs tenues sont désormais interchangeables.

Si cette évolution se poursuit, les meilleurs élèves se battront sans doute demain pour intégrer les lycées technologiques, afin d'y développer leur habileté conceptuelle et leur maîtrise des idées abstraites. ■

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

Objets D'ici & D'ailleurs

Bijoux solaires

Météorites

Cadrans solaires

Montres solaires

Bijoux Solaires

bijouxsolaires.com

La Clef des ETOILES

Boutique à Toulouse
& sur internet

laclefdesetoiles.com

Votre spécialiste du matériel d'observation astronomie & nature

La Clef des ÉTOILES - 3 rue Romiguières 31000 TOULOUSE - 05 61 22 58 55

CABINET DE CURIOSITES SOCIOLOGIQUES par Gérald Bronner

Une rentrée apocalyptique ?

Septembre 2015 s'annonce catastrophique, à en croire diverses « prophéties » qu'Internet propage à tout-va. Des prédictions souvent fondées sur des procédés ineptes.

Les prêcheurs d'apocalypse semblent s'être donné rendez-vous en cette rentrée 2015. Internet bruisse de prédictions effrayantes. L'exercice militaire américain *Jade Helm*, par exemple, qui devait se dérouler jusqu'à la mi-septembre dans cinq États du pays, suscite toutes sortes de commentaires apocalypti-co-conspirationnistes. À tel point que trois hommes s'étaient mis en tête d'assassiner des soldats impliqués dans cet exercice – mais ils ont été arrêtés en Caroline du Nord avant qu'ils ne mettent en œuvre leur funeste projet. Dans l'esprit de certains, en effet, *Jade Helm* constituerait le coup d'envoi d'une reprise en main despotique du pays et d'une série de catastrophes dignes de l'Armageddon.

Ce n'est pas tout. D'autres, comme le sulfureux économiste Martin Armstrong, qui prédit l'avenir grâce à un modèle fondé sur l'idée de cycle et le nombre π, considèrent que nous allons connaître une nouvelle crise économique dont l'ampleur dépassera les précédentes et conduira à des révolutions qui renverseront les démocraties.

D'autres encore s'entendent sur la date, mais mobilisent des techniques prédictives différentes, telle la guématrie, interprétation arithmétique des textes bibliques visant à en trouver le sens caché. En tâtonnant un peu, on peut faire dire beaucoup de choses à la Bible, par exemple que la Terre risque d'être frappée par un astéroïde ce mois de septembre. C'est justement la dernière prévision guématrique en date.

Ce n'est pas la première fois que certains trouvent un « code secret » dans ce livre. Le journaliste et écrivain américain Michael Drosnin en a même tiré un *best-seller* mondial. Selon lui, pour peu qu'on connaisse ce code, on peut trouver d'incroyables prophéties qui annoncent aussi bien l'arrivée d'Hitler au pouvoir que l'assassinat de John Kennedy.

La technique est assez simple. Il suffit, par exemple, de ne retenir qu'une lettre toutes les cinq lettres du texte, pour voir de nouvelles combinaisons apparaître. Le chercheur en guématrie retiendra celles qui lui permettront de glaner les messages les plus spectaculaires. Évidemment, il y a un énorme déchet de lettres ne formant pas de mots ; mais en ne gardant que les phrases ayant du sens, on a vite l'impression que ce ne peut être une coïncidence.

LA CHUTE D'UN ASTÉROÏDE : c'est l'une des prédictions fondées sur un procédé arithmétique de « décodage » de la Bible.

C'est bien entendu la conviction de Michael Drosnin. Lors de la controverse qui suivit la publication de son livre *La Bible : le code secret*, il affirma qu'il est impossible de trouver de tels messages codés dans d'autres livres.

Il n'en fallait pas plus pour mettre des sceptiques au travail. En respectant les règles guématriques, le mathématicien australien Brendan McKay a montré qu'on trouvait aussi des messages prophétiques dans *Moby Dick*. En réalité, en appliquant une méthode de décryptage arbitraire à n'importe quel texte assez long, on finit toujours par trouver des mots, voire des phrases cohérentes. Ce que cache cette méthode, c'est le nombre considérablement plus grand de groupes de lettres sans aucune signification : un immense déchet de non-sens.

L'expérience de Brendan McKay suffirait à elle seule à clore le dossier, mais d'autres mathématiciens se sont employés à montrer la fragilité des thèses guématriques. En appliquant la même technique de lecture des lettres équidistantes, certains ont réussi à trouver dans la Bible elle-même des messages tels que « Dieu est détestable », « Haïssez Jésus », ainsi que des phrases contradictoires telles « Il y a un Dieu » et « Il n'y a pas de Dieu ».

Avant de craindre l'apocalypse annoncée pour septembre, il est bon de se souvenir que Michael Drosnin lui-même prédisait une guerre nucléaire au Proche-Orient... pour l'année 2006. Je fais donc le pari que le monde ne s'effondrera pas en cette rentrée et que vous pourrez lire ces lignes – ce qui n'est pas bien téméraire car, dans le cas contraire, il ne restera plus personne pour me démentir. ■

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

Versions numériques OFFERTES sur www.pourlascience.fr

Offre DÉCOUVERTE

POUR LA SCIENCE

Le magazine mensuel
Pour la Science (12 nos)

+

Le hors-série trimestriel
Dossier Pour la Science (4 nos)

59€ seulement

1 AN - 12nos

des numéros reçus pendant la durée de votre contrat en cours (uniqu... mer

VOS AVANTAGES ABONNÉ

- ✓ **24 % d'économie et plus** par rapport au prix en kiosque
- ✓ L'envoi des magazines **en avant-première**
- ✓ La garantie de ne **manquer aucun numéro**

BULLETIN D'ABONNEMENT

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

POUR LA SCIENCE

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

❑ (S1A) **1 an • 12 numéros • 59€** au lieu de ~~78,50€~~
Tarif valable uniquement en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 12€ – autres pays 25€

❑ (S2A) **2 ans • 24 numéros • 110€** au lieu de ~~157€~~
Tarif valable uniquement en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 25€ – autres pays 51€

Le mensuel + Le trimestriel

J'indique mes coordonnées

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

Je choisis mon mode de règlement

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

❑ Par carte bancaire

Numéro de carte _____
Date d'expiration _____ / _____
Clé _____
Les 3 chiffres au dos de votre CB

Signature obligatoire

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

_____ @ _____

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** ❑

Tarifs réservés aux nouveaux abonnés

PLS45

CRISPR-Cas9 l'outil qui révolutionne la génétique

Emmanuelle Charpentier et Pierre Kaldu

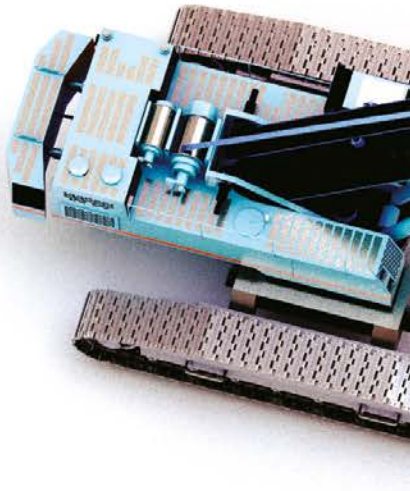
Un système de défense immunitaire bactérien, CRISPR-Cas9, est devenu un outil précis, simple et universel pour modifier les gènes de n'importe quelle cellule à volonté. Un frein majeur de la génétique est levé.

Depuis 2012, un rêve des généticiens s'accomplit. Un mécanisme a été découvert chez les bactéries, qui permet de modifier à volonté le patrimoine génétique des organismes vivants. Jusqu'à présent, les chercheurs restaient assez démunis pour agir directement sur la séquence d'ADN, cette longue molécule qui code le développement et le fonctionnement des cellules et des organismes. C'était d'autant plus frustrant que, grâce aux progrès fulgurants des techniques de séquençage des génomes, le patrimoine génétique de dizaines d'espèces animales et végétales avait été décrypté. Pour obtenir une souris portant une mutation responsable d'une maladie génétique humaine, par exemple, il fallait des mois, voire des années. Avec le mécanisme bactérien CRISPR-Cas9, ce délai se trouve raccourci à quelques semaines. Pour la première fois, un accès direct, facile et précis à l'ADN contenu dans les cellules vivantes devient possible à un grand nombre de laboratoires. Pour découvrir ce nouvel outil, il suffisait de se pencher sur les bactéries, expertes en manipulation de l'ADN depuis des milliards d'années.

Les bactéries peuvent-elles être vaccinées ? Cette question peut paraître futile, mais elle a une grande importance pour l'industrie alimentaire, celle qui utilise des quantités massives de bactéries pour faire du fromage ou du yaourt. Les virus de bactéries – les bactériophages – sont nombreux, et beaucoup peuvent compromettre la production d'une usine en infectant

L'ESSENTIEL

- En s'inspirant d'un mécanisme de défense bactérien, des biologistes ont mis au point un outil pour modifier avec précision l'ADN de n'importe quelle cellule.
- Seuls deux ingrédients sont nécessaires pour couper l'ADN à l'endroit voulu : une enzyme, Cas9, et un petit ARN spécifique de la séquence à modifier.
- Recherche fondamentale, thérapie génique, agriculture, cette technique ouvre des horizons dans de nombreux domaines.



LES AUTEURS

Emmanuelle CHARPENTIER, professeure à l'université d'Umeå, en Suède, et à l'école de médecine de Hanovre, en Allemagne, dirige le département Régulation en biologie de l'infection au centre de recherche sur l'infection Helmholtz, à Braunschweig en Allemagne.

Pierre KALDY est journaliste scientifique.

5 découvertes clés

1953 La structure de l'ADN et son rôle dans le transfert de l'information génétique (prix Nobel 1962).

1970 Des enzymes bactériennes, dites de restriction, coupent les séquences spécifiques de l'ADN. Premiers outils de caractérisation et de manipulation spécifique de l'ADN *in vitro* (prix Nobel 1978).

1983 La réaction en chaîne par polymérase (PCR) permet de multiplier les séquences d'ADN *in vitro*. La caractérisation et la manipulation de séquences d'ADN *in vitro* devient possible pour la plupart des ADN trouvés dans la nature (prix Nobel 1993).

1989 Première modification ciblée du génome d'un animal, la souris (prix Nobel 2007).

2012 Mise au point de l'outil CRISPR-Cas9, permettant des modifications multiples ciblées de tout ADN *in vivo*.

tuant les souches bactériennes utilisées. En 2007, deux biologistes français de la société Danisco, au Danemark, Rodolphe Barrangou et Philippe Horvath, et l'équipe canadienne de Sylvain Moineau de l'université de Laval, à Québec, annoncent qu'ils ont réussi à immuniser une bactérie alimentaire, *Streptococcus thermophilus*, contre un virus. De plus, ils prouvent que les rares bactéries qui ont résisté à l'attaque virale se défendent en conservant dans leur génome une partie de l'ADN du virus qui les a pénétrées. Ce « souvenir » du passage viral lui permet de parer à toute nouvelle intrusion du virus. Mieux, la bactérie dispose d'une « bibliothèque » de souvenirs des infections passées sur son chromosome, qui lui permet de reconnaître tout nouvel ADN étranger déjà rencontré, qu'il provienne d'un bactériophage ou de molécules circulaires nommées plasmides.

La mémoire des bactéries

Cette bibliothèque, dont le rôle intriguait les microbiologistes depuis des années, avait été nommée CRISPR (acronyme anglais pour « courtes répétitions palindromiques groupées et régulièrement inter espacées »). Il s'agissait, en fait, de la mémoire des récentes agressions virales subies par la bactérie et ses ancêtres au cours de leur vie. Insérer un fragment d'ADN d'un nouveau virus dans ces séquences, comme l'ont fait Rodolphe Barrangou, Philippe Horvath, Sylvain Moineau et leurs collègues, donnait à la bactérie la capacité de résister à ce virus. En héritant des séquences CRISPR ou en se les transmettant, les bactéries acquéraient une mémoire des agressions virales subies, et même une immunité contre elles. Les bactéries étaient donc elles aussi dotées d'un système immunitaire adaptatif.

Les recherches bio-informatiques sur le système CRISPR ont révélé qu'il est présent dans environ 50 % des bactéries et 90 % des archées connues. Sa séquence contient non seulement des échantillons d'ADN étranger, mais aussi les gènes de plusieurs enzymes nommées Cas (pour « CRISPR associées »). Celles-ci assurent le stockage de ces fragments dans le chromosome bactérien et leur utilisation, sous forme de copies d'ARN complémentaire *(voir l'encadré page ci-contre)*, pour reconnaître et détruire le nouvel ADN viral introduit. Trois types de système CRISPR avaient été mis au jour parmi les bactéries, chaque espèce étant dotée de l'un d'eux (aujourd'hui, on en connaît cinq types). Il restait à comprendre comment il fonctionne.

Comment les bactéries ou les archées éliminaient-elles les virus en utilisant les échantillons d'ADN viral archivés dans leur système CRISPR ? En 2010, la même équipe franco-canadienne montre que le système CRISPR de type II agit en coupant l'ADN étranger en un point précis de sa séquence, et que celle-ci doit comporter un signal reconnu spécifiquement par l'enzyme – une courte séquence nommée PAM. Les séquences CRISPR de la bactérie sont dépourvues de la séquence PAM, ce qui évite leur coupure sur le chromosome, alors qu'elle est très fréquente dans l'ADN des bactériophages.

En 2011, les chercheurs français découvrent avec des collègues lituaniens que, dans le système CRISPR de type II, une enzyme, Cas9, peut à elle seule reconnaître et couper spécifiquement un ADN étranger quand la bactérie dispose d'une copie de cette séquence dans son site CRISPR. La même année, l'un de nous (Emmanuelle Charpentier), alors à l'université d'Umeå, en Suède, montre qu'un petit ARN spécifique – nommé tracr – est nécessaire à l'enzyme Cas9.

Lors d'une infection, la séquence CRISPR est transcrite en une copie sous forme d'un long ARN contenant tous les ARN complémentaires des ADN viraux engrangés. L'ARN tracr s'hybride avec ce long ARN, entre les ARN viraux. Il forme ainsi des sortes de repères qui permettent à une autre enzyme, en présence de Cas9, de débiter le long ARN de CRISPR en ses séquences d'ARN d'origine virale et d'associer chacune à une enzyme Cas9.

Une enzyme et un ARN guide

Désormais, l'un de nous (Emmanuelle Charpentier) connaissait le cocktail pour programmer *in vitro* une coupure de l'ADN à un endroit précis. Il devait comporter l'enzyme Cas9, une copie de l'ADN ciblé sous forme d'un petit ARN complémentaire, et un autre petit ARN – tracr – propre à l'enzyme. En 2012, avec l'équipe de Jennifer Doudna, de l'université de Californie, à Berkeley, nous (Emmanuelle Charpentier et son équipe) avons montré qu'il était possible de réunir les deux petits ARN en un seul ARN guide pour l'enzyme Cas9. Et que l'ARN ainsi construit était à lui seul

suffisant pour guider l'enzyme Cas9 jusqu'à n'importe quelle séquence d'ADN visée *in vitro*. De plus, l'enzyme s'est ensuite révélée plus efficace dans les cellules eucaryotes avec l'ARN guide unique plutôt qu'avec la combinaison des deux ARN du système CRISPR bactérien d'origine. Une chirurgie précise et universelle des génomes pouvait commencer. Cela faisait suite à une longue histoire pour modifier d'une manière de plus en plus contrôlée le génome des organismes.

Modifier l'ADN est le seul moyen de changer durablement une cellule ou un organisme. Bien avant que le rôle de l'ADN en tant que support de l'information génétique n'ait été établi en 1944, l'homme a fait des croisements au sein d'espèces animales et végétales pour sélectionner les traits héréditaires qui l'intéressaient, et donc les génomes qui en étaient responsables. Cette sélection reposait sur l'apparition aléatoire, au fil des générations, de rares mutations dans l'ADN.

Mais à partir des années 1920, on a découvert des moyens de produire des mutations. Le généticien américain Hermann Muller a montré que l'exposition aux rayons X accélère l'apparition de mutations chez la mouche, ce qui lui vaudra le prix Nobel de physiologie ou médecine en 1946. Puis des produits chimiques s'attaquant à l'ADN se sont révélés eux aussi mutagènes. Plus récemment, on utilise aussi des virus capables de s'intégrer dans le génome de manière aléatoire. Actuellement, toutes les plantes agricoles sélectionnées par les semenciers sont encore issues d'une mutagenèse chimique. Les mutants obtenus demeurent aléatoires, et leur tri

COMMENT LE SYSTÈME CRISPR-CAS9 PROTÈGE LA BACTÉRIE

Grâce au système CRISPR-Cas9, de nombreuses bactéries sont capables de reconnaître un virus qui les a déjà infectées et de contrer son attaque. Sorte de bibliothèque, CRISPR est une région du génome bactérien où, lors d'une attaque virale, la bactérie engrange des séquences de l'ADN viral. Quand une nouvelle attaque a lieu, l'enzyme Cas9, guidée par deux ARN, reconnaît le nouvel ADN viral introduit et le rend inopérant en le coupant.

Acquisition

Reconnues à l'aide de petits motifs adjacents – les séquences PAM –, des séquences de l'ADN viral sont insérées dans la région CRISPR du génome bactérien.

Infection

Un virus (bactériophage) injecte son ADN dans la bactérie.

Destruction

Détruit, l'ADN viral ne peut plus servir à produire les protéines nécessaires à la réplication du virus.

Maturation de Cas9

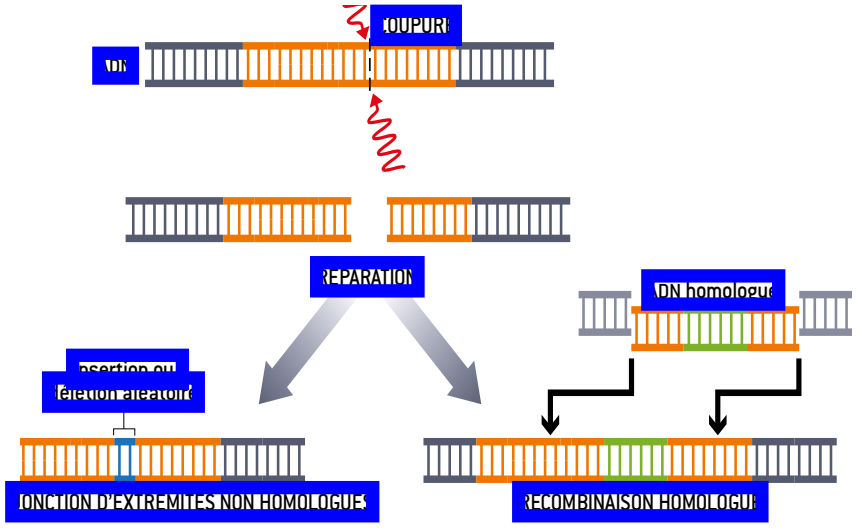
En cas d'attaque virale, la région CRISPR et une région adjacente sont activées. L'enzyme Cas9 et un petit ARN, tracr, sont produits, ainsi qu'un ARN pour chaque séquence virale enregistrée dans CRISPR. Cas9 forme un complexe avec tracr et chaque ARN viral.

Reconnaissance

L'enzyme Cas9 reconnaît la séquence PAM sur l'ADN étranger puis, grâce à ses deux ARN guides, une séquence plus longue qu'il coupe à une distance précise de PAM (trois nucléotides).

Nouvelle infection

Un virus déjà rencontré injecte son ADN dans la bactérie.



DANS LES CELLULES, L'ADN SE RÉPARE selon deux procédés lorsqu'il est coupé sur ses deux brins (par un rayonnement ionisant, des radicaux libres, une enzyme...). Si aucune séquence homologue (similaire) n'est disponible, une jonction a lieu avec insertion ou délétion aléatoire de quelques nucléotides *(à gauche)*, ce qui permet d'inactiver le gène sectionné. Si un ADN homologue est présent, un échange se produit avec cette séquence *(à droite)*. Avec l'outil CRISPR-Cas9, c'est cette recombinaison dite homologue que les biologistes favorisent en des endroits précis du génome pour modifier une séquence ou la remplacer par une autre *(en vert)*.

pour sélectionner les traits recherchés peut prendre des années, de même qu'isoler ensuite dans le génome la mutation responsable d'un caractère intéressant.

En 1985, enfin, Oliver Smithies, de l'université de Madison dans le Wisconsin, et ses collègues produisent la première modification ciblée du génome d'une cellule animale. Les biologistes montrent que deux séquences d'ADN homologues (c'est-à-dire très proches) codant un gène, l'une portée par le chromosome, l'autre introduite dans la cellule, peuvent être échangées dans des cellules de mammifères. Cette « recombinaison homologue » reste cependant un événement rare, ce qui exige de tester un très grand nombre de cellules pour sélectionner celles ayant effectué l'échange.

En 1988, Mario Capecchi et son équipe à l'université de l'Utah présentent une méthode pour cibler et inactiver par recombinaison homologue n'importe quel gène dans des cellules embryonnaires de souris cultivées *in vitro*. Incorporées à des embryons précoces de souris, ces cellules produisent de nouveaux individus grâce à une technique mise au point par l'équipe britannique de Martin Evans, à l'université de Cambridge.

Pour la première fois, il devenait possible de cibler et de modifier un gène déterminé dans une cellule de mammifère, et de fabriquer des souris portant cette modification dans leur génome. L'ensemble de ces découvertes valut en 2007 le prix Nobel de physiologie ou médecine à Mario Capecchi, Martin Evans et Oliver Smithies. Depuis, plus de 18 000 gènes sur les 20 000 du génome de la souris ont été mutés dans

Le ciblage de l'ADN ne repose plus sur une protéine, mais sur un petit ARN que les laboratoires de biologie fabriquent aisément

des cellules souches embryonnaires et plus de 1 700 souris mutées sur un gène ont été produites, leur étude étant désormais gérée par un consortium international. Cependant, cette technique n'a pu être reproduite facilement chez d'autres animaux que la souris, en raison notamment de la difficulté à cultiver des cellules souches embryonnaires *in vitro* issues d'autres espèces animales.

Toutefois, en 1994, une découverte change la donne. Des biologistes de l'institut Pasteur et de l'institut Sloan-Kettering à New York montrent indépendamment que la réparation d'un gène par recombinaison homologue est fortement amplifiée dans les cellules de mammifères quand on introduit dans ce gène une cassure avec une enzyme de levure. Si aucune séquence homologue n'est présente pour donner lieu à un échange, le site sectionné par l'enzyme est comblé ou dégradé *via* un processus de jonction d'extrémités non homologues beaucoup plus fréquent, ce qui inactive le gène visé *(voir la figure ci-contre)*.

Dès lors, il devenait possible d'activer la recombinaison homologue dans un nombre beaucoup plus grand de cellules. Restait à trouver les bonnes enzymes qui pénétreraient dans le noyau cellulaire et y couperaient l'ADN de manière ciblée. Nombre de biologistes se sont lancés dans cette quête.

Des nucléases faites sur mesure pour cibler et couper l'ADN

Une première approche consiste à fabriquer une protéine reconnaissant une séquence précise d'ADN à l'aide de « doigts de zinc ». Présents dans des protéines qui régulent l'expression des gènes, ces motifs reconnaissent chacun un groupe de trois « lettres » (nucléotides) de la séquence d'ADN. On peut ainsi aligner de tels doigts de zinc de façon à former une protéine qui reconnaît une séquence donnée d'ADN. Et couplée à une enzyme bactérienne qui coupe l'ADN – une nucléase –, elle forme une « nucléase à doigts de zinc », un ciseau spécifique de la séquence choisie.

En 2002, ce nouvel outil permet à l'équipe américaine de Dana Carroll, de l'université de l'Utah, d'obtenir pour la première fois une mutation ciblée d'un gène chez un être pluricellulaire, la mouche. L'année suivante, le même outil sert aux chercheurs à corriger le gène par recombinaison homologue. Menée sur des cellules embryonnaires de la mouche, l'opération leur permet aussi de modifier le génome de l'insecte et de rendre la mutation héréditaire.

L'utilisation des nucléases à doigts de zinc se répand pour introduire ou corriger des mutations dans des cellules humaines, d'animaux et de diverses plantes. En 2008, le génome d'un poisson est modifié, puis en 2009 celui du rat, du tabac et du maïs. Grâce aux nucléases à doigts de zinc, l'homme modifie *in vivo* le génome d'organismes pluricellulaires. Les nucléases à doigts de zinc doivent cependant être fabriquées sur mesure pour chaque séquence choisie, ce qui est complexe et coûteux, et elles ont une efficacité très variable selon la séquence visée.

En 2010, un nouveau type d'enzyme spécifique de séquence est mis au point par Daniel Voytas, de l'université du Minnesota aux États-Unis, et son équipe. Les biologistes ont utilisé les motifs d'une protéine bactérienne, TALE. Chaque motif reconnaît un nucléotide particulier sur l'ADN. En alignant plusieurs motifs, ils ont fabriqué une protéine spécifique d'une séquence ADN choisie. Et en couplant cette protéine à la même nucléase bactérienne que celle des nucléases à doigts de zinc, ils ont montré que leur nucléase à motifs TALE – nommée TALEN – coupe l'ADN sur la séquence ciblée.

Beaucoup plus souple et fiable, ce nouveau ciseau spécifique est vite adopté dans de nombreux laboratoires. Trois ans plus tard, les génomes modifiés grâce à lui sont multiples : levure, mouche, poisson, riz ou ver à soie, cellules humaines… Comme les nucléases à doigts de zinc, cependant, les TALEN sont des protéines conçues en fonction de chaque séquence visée. Leur efficacité reste variable *in vivo* et très réduite si l'ADN a été modifié chimiquement (par des méthylations par exemple), ce qui est fréquent dans les cellules.

En 2012, l'outil Cas9 permet de s'affranchir de toutes ces contraintes. Le ciblage de l'ADN ne repose plus sur une protéine, mais sur un petit ARN guide que les laboratoires de biologie fabriquent aisément *(voir l'encadré ci-dessous)*. L'utilisation de Cas9 pour muter l'ADN de cellules ou d'organismes se répand alors comme une traînée de poudre parmi les chercheurs, sur les traces des premiers succès avec les enzymes TALEN. La mutualisation des moyens accélère encore sa diffusion : des logiciels en libre accès déterminent les meilleures séquences d'ARN guide pour les gènes et les génomes ciblés, et des laboratoires américains mettent à disposition des constructions génétiques permettant de produire rapidement ces ARN et l'enzyme Cas9, ce qui est radicalement nouveau. L'introduction de plusieurs ARN guides différents dans la cellule permet de modifier simultanément plusieurs gènes ou d'améliorer encore le ciblage.

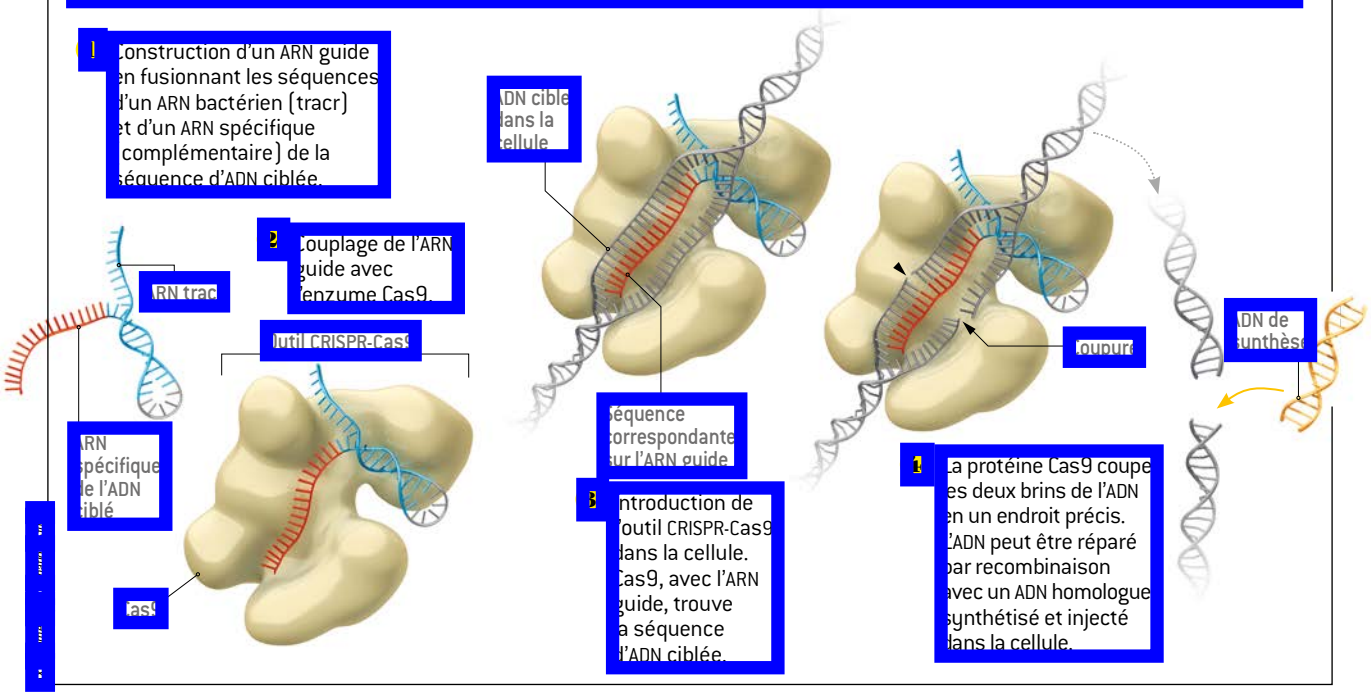
Début 2013, quatre équipes, aux États-Unis et en Corée du Sud, décrivent l'inactivation de gènes dans des cellules humaines avec une efficacité inédite. Ainsi, George Church, de l'université Harvard, et ses collègues montrent qu'avec deux ARN guides, l'enzyme Cas9 adaptée à des cellules de mammifères répare un gène dans 8 % des cellules, contre 0,5 % avec l'enzyme TALEN.

Riz, souris, singe, Cas9 s'adapte à tout

Feng Zhang, de l'institut Broad du MIT et de Harvard, et ses collègues présentent des résultats similaires. Quelques mois plus tard, l'équipe du pionnier des souris transgéniques Rudolf Jaenisch s'associe à Feng Zhang et annonce avoir muté simultanément cinq gènes dans des cellules souches embryonnaires de souris. Les biologistes ont aussi produit en une étape des souris portant des mutations sur deux gènes distincts : en injectant l'enzyme Cas9 et ses ARN guides dans des cellules œufs de souris (la cellule œuf est la première cellule issue de la fécondation), ils ont inactivé les deux gènes à la fois dans 80 % des souris obtenues. Auparavant, il fallait introduire les mutations de façon séquentielle, soit par recombinaison des cellules souches embryonnaires présentant

COMMENT L'OUTIL CRISPR-CAS9 FONCTIONNE

Les bactéries ont développé une arme précise et efficace, CRISPR-Cas9, contre les invasions virales. Des biologistes l'ont détournée pour en faire des ciseaux moléculaires coupant, dans les cellules, l'ADN à un endroit ciblé. Contrairement aux méthodes antérieures pour modifier le génome, qui nécessitent des enzymes spécifiques à chaque situation, l'outil CRISPR-Cas9 utilise une même protéine, l'enzyme Cas9, pour toutes les situations. Le seul élément spécifique à construire est un ARN qui guide l'enzyme Cas9 à l'endroit du génome à couper. Et les ARN sont bien plus simples à synthétiser que des enzymes…



Les pistes explorées avec Cas9

En permettant de modifier un ou plusieurs gènes en même temps dans tout type cellulaire, le système CRISPR-Cas9 ouvre d'infinies possibilités que les biologistes commencent à explorer dans des domaines très variés : agriculture, recherche fondamentale, thérapie génique, synthèse de biocarburants ou de médicaments... Voici quelques exemples de travaux pionniers déjà réalisés avec l'enzyme Cas9.

CAS9

AGRICULTURE

Plantes résistantes

En 2014, l'équipe de Caixia Gao et Jin-Long Qiu, de l'Académie des sciences de Pékin, a produit un blé tendre mutant qui résiste à un champignon parasite, l'oïdium du blé. Elle a inactivé les six exemplaires d'un gène de susceptibilité à ce champignon. La plante ainsi modifiée résiste au parasite. L'outil utilisé n'était pas Cas9, mais un autre ciseau moléculaire, TALEN. Néanmoins, les biologistes précisent avoir obtenu des résultats préliminaires comparables avec Cas9. La méthode serait applicable à d'autres plantes présentant plus de deux copies de leurs chromosomes (plantes polyploïdes), telles que la pomme de terre, le colza, l'avoine ou la canne à sucre. Dans ces plantes, on ne savait pas, jusqu'à présent, produire de mutations multiples.

RECHERCHE FONDAMENTALE

Modèle animal de maladie

En 2015, pour mieux étudier la myopathie de Duchenne, une équipe de l'Académie des sciences de Pékin a obtenu des singes portant des mutations responsables de la maladie sur le gène de la dystrophine, une protéine des fibres musculaires. Les primates ont développé la maladie.

Étude fonctionnelle

En 2015, à l'aide de milliers de virus portant des ARN guides différents, Aviv Regev de l'institut Broad du MIT et de Harvard, dans le Massachusetts, et ses collègues ont muté plus de 21 000 gènes séparément dans des cellules immunitaires de souris qui expriment l'enzyme Cas9. L'étude de la réponse de ces cellules de l'animal à un signal bactérien a permis d'identifier de nombreuses protéines nécessaires à la sécrétion de TNF, un puissant messager soluble de l'inflammation.

Biologie du développement

En mutant un seul gène chez le ver nématode *Caenorhabditis elegans*, des chercheurs suisses de l'institut Friedrich Miescher à Bâle ont pu confirmer qu'il était le seul à déterminer la formation de la vulve chez les femelles.

THERAPIE GENIQUE

Soigner un organe défectueux

En 2014, l'équipe de Daniel Anderson, au MIT à Boston, a corrigé chez la souris une tyrosinémie, maladie fatale du foie due à une mutation ponctuelle dans le génome. L'équipe a remplacé la partie mutée du gène par une partie saine en injectant dans le sang de l'animal l'enzyme Cas9, trois ARN guides ciblant le gène, et le fragment d'ADN portant la séquence saine. Seules 0,4 % des cellules du foie ont été modifiées, mais cela a suffi à guérir les animaux, les cellules corrigées pouvant à nouveau proliférer et régénérer le foie.

Baisser le taux de cholestérol

L'équipe de Feng Zhang, au MIT, a fait chuter de moitié en une semaine le taux de cholestérol sanguin chez des souris. Les animaux ont reçu un vecteur viral qui a transporté le gène de l'enzyme Cas9 et son ARN guide pour inactiver, dans les cellules du foie, un gène régulateur de la synthèse du cholestérol. Plus de 40 % du tissu a été correctement modifié.

Réparer des cellules souches *ex vivo*

L'anémie falciforme est une maladie du sang due à une seule mutation sur le gène de la chaîne β de l'hémoglobine. En 2015, avec Cas9, Linzhao Cheng et son équipe de l'université Johns Hopkins à Baltimore ont corrigé cette mutation dans des cellules souches du sang de patients et rétabli la production d'une chaîne β normale. La réintroduction chez les patients de telles cellules est la prochaine étape. Cette approche est envisageable pour d'autres maladies du sang telles que l'hémophilie, et pourrait remplacer les thérapies géniques actuelles par insertion de gène.

Bloquer l'infection par le virus du sida

Les rares personnes porteuses de mutations inactivant le gène de la protéine CCR5, un récepteur du virus du sida, ne sont pas infectées par le virus. En 2014, à l'aide de Cas9, l'équipe de Chad Cowan, de l'université Harvard, a inactivé ce gène dans les cellules souches du système immunitaire. Une autre équipe, de l'université de Pennsylvanie, a fait de même avec une nucléase à doigts de zinc. En 2014, une première étude sur des patients séropositifs ayant reçu leurs cellules souches ainsi modifiées a montré une baisse importante du nombre de cellules infectées chez ces patients, même en l'absence de traitement antiviral.

chacune une mutation, soit par croisement de deux souris porteuses chacune d'une mutation. Le procédé demandait souvent plus d'un an, alors que quatre semaines ont suffi à Feng Zhang et ses collègues. En effet, ils ont évité l'étape de sélection des cellules souches embryonnaires mutées (et les risques de mutations liés à leur culture *in vitro*), de même que la sélection, dans la descendance, des souris ayant hérité de chaque mutation.

La même année, plusieurs groupes rapportent la correction ou la mutation de gènes chez le poisson et diverses plantes telles que le riz, le tabac, le sorgho ou la plante modèle *Arabidopsis thaliana*. Et en 2014, pour la première fois, des primates génétiquement modifiés de manière ciblée sont obtenus. Des biologistes de l'université médicale de Nankin, en Chine, ont inactivé simultanément deux gènes chez le macaque crabier en injectant dans une cellule œuf l'ARN codant l'enzyme Cas9 et ses ARN guides. La cellule a ensuite été implantée chez une femelle, comme pour une fécondation *in vitro*, et deux singes ont pu naître avec les deux gènes ciblés inactivés sur au moins un des deux chromosomes homologues.

Après les tests de faisabilité viennent vite les premières applications. Dès 2013, Jinsong Li, de l'Académie des sciences chinoise à Shanghai, et ses collègues corrigent chez la souris une mutation causant une cataracte héréditaire. Les animaux sont guéris. En 2014, passant à une autre échelle, Feng Zhang et ses collègues produisent des cellules humaines mutées sur plus de 18 000 gènes en utilisant trois à quatre ARN guides par gène inactivé. Plus de 90 % des cellules portaient les mutations. Cet outil de mutagenèse massive, mais ciblée, leur a permis d'identifier six gènes de résistance à un médicament utilisé contre le mélanome (un cancer de la peau), dont deux étaient déjà connus.

L'inverse – élucider le rôle d'un gène en le mutant, ou génétique inverse – devient aussi possible dans tous les organismes (hormis l'homme pour des questions éthiques) et pour plusieurs gènes à la fois. Toutes les connaissances accumulées depuis des années sur les génomes et leurs mutations peuvent désormais être testées du point de vue fonctionnel. Notamment, Feng Zhang et ses collègues ont produit des souris dans le génome desquelles ils ont inséré le gène de l'enzyme Cas9. Ils peuvent ainsi déclencher l'expression de Cas9 dans le tissu choisi et, en introduisant des ARN guides, y produire les mutations génétiques souhaitées. Cela leur a permis de tester l'effet, chez la souris, de trois mutations responsables du cancer du poumon chez l'homme. Induites dans les cellules pulmonaires de souris, les trois mutations ont produit un cancer du poumon chez tous les animaux testés.

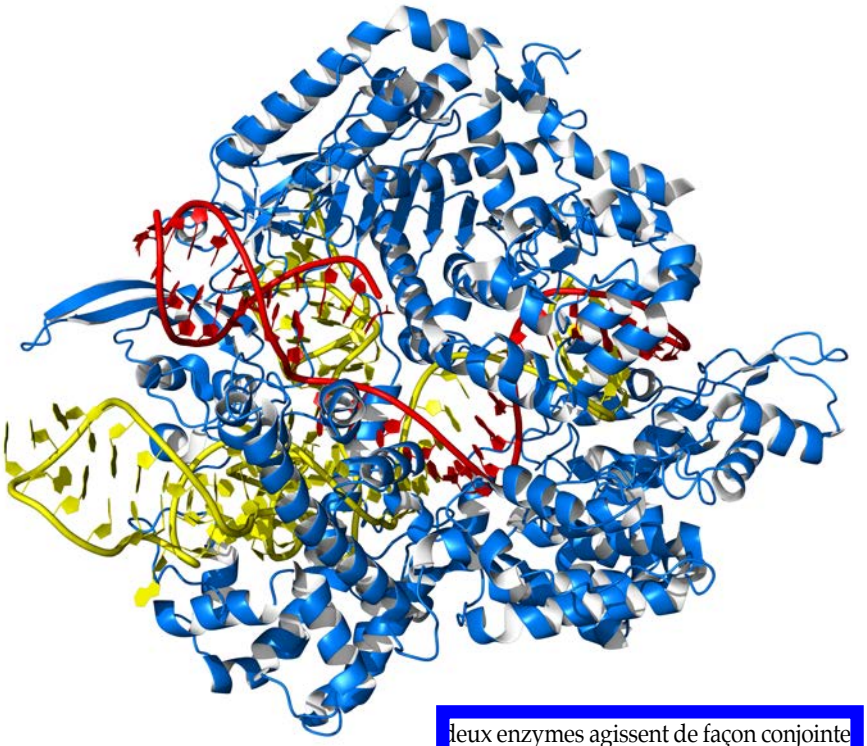
De même, en 2015, Hans Clevers, de l'université d'Utrecht aux Pays-Bas, et ses collègues ont confirmé le rôle clef de quatre mutations sur quatre gènes distincts, impliquées dans l'apparition du cancer du colon. Ils ont déclenché un cancer du côlon chez des souris en produisant des mutations dans des cellules souches de l'intestin.

Ainsi, grâce à Cas9, il devient possible de changer avec précision n'importe quelle séquence du génome, et cela dans n'importe quelle cellule, y compris la cellule œuf d'une espèce. Diverses équipes l'ont vérifié dans la plupart des organismes modèles étudiés en recherche. Dans certains cas, c'était une première, comme dans celui des protozoaires – des organismes unicellulaires dont plusieurs sont responsables de maladies. Les agents du paludisme, de la toxoplasmose, de la leishmaniose, de la trypanosomiase et de la cryptosporidiose ont ainsi été modifiés.

Les pistes de recherche offertes sont multiples : étudier le rôle de gènes dans le développement ou le fonctionnement des organismes, corriger ou reproduire des maladies chez l'animal, introduire de nouvelles propriétés chez les plantes *(voir l'encadré page ci-contre)*…

Des biologistes cherchent aussi à perfectionner la technique, notamment pour éviter les erreurs de ciblage. Le recours à deux enzymes Cas9 mutées, chacune capable de couper seulement un des deux brins opposés de l'ADN, a ainsi considérablement réduit le risque d'erreur. La coupure des deux brins n'est obtenue que lorsque les

Cas9 va décupler les moyens de mieux connaître le vivant et ses ressorts génétiques.



LA STRUCTURE 3D de l'enzyme Cas9 *(en bleu)* couplée à son ARN guide *(en jaune)* et son ADN cible *(en rouge)*, établie en 2014, permet de positionner, dans la conformation du complexe CRISPR-Cas9, les régions de l'enzyme impliquées dans son activité, ce qui facilite sa modification en vue de perfectionner l'outil sans perturber son fonctionnement de base.

deux enzymes agissent de façon conjointe sur le même site. Quant aux coupures faites séparément par ces enzymes sur un seul brin, la cellule les répare spontanément. Des moyens informatiques ont aussi été développés pour déterminer les séquences cibles les plus spécifiques dans le génome et limiter ainsi le risque de coupures indésirables.

Coupler Cas9 à d'autres molécules

D'autres chercheurs explorent les possibilités de cibler de nouvelles activités sur l'ADN avec l'enzyme Cas9. En 2014, une équipe a cristallisé le complexe formé par l'enzyme Cas9, son ARN guide et son ADN cible. L'étude de ce cristal a révélé la structure tridimensionnelle de l'enzyme *(voir la figure ci-dessus)*, apportant des précisions qui aident à modifier l'enzyme sans perturber son activité de reconnaissance. Les biologistes peuvent en effet fixer des protéines sur Cas9 pour moduler son activité, par exemple pour l'activer en présence de lumière ou d'une substance chimique.

Même inactivée en tant que nucléase, l'enzyme Cas9 peut encore servir à diriger précisément d'autres protéines vers des séquences spécifiques du génome. Par exemple, fixée à un marqueur fluorescent, elle a permis de visualiser des séquences précises dans le noyau cellulaire. Et en la couplant à des protéines qui activent ou répriment la transcription de l'ADN, on est capable de contrôler l'activité de gènes précis *in vivo*.

Les possibilités d'utilisation de l'enzyme Cas9 paraissent illimitées et font déjà l'objet d'un intense développement commercial. En mars 2013, l'un d'entre nous (E. Charpentier) a déposé le premier brevet pour l'utilisation de l'enzyme avec ARN guide et, depuis, plusieurs brevets ont été publiés pour diverses utilisations du système CRISPR-Cas9. Des start-up, souvent soutenues par de gros laboratoires pharmaceutiques, se sont déjà créées afin d'exploiter les multiples possibilités qu'offre ce système pour cibler des interventions sur l'ADN des animaux et des plantes.

Avec le système CRISPR-Cas9, un moyen de transformation efficace, multiple et accessible de l'ADN *in vivo* est apparu. Il arrive à un moment où le séquençage et le décryptage des génomes apportent une foule d'informations génétiques à analyser. Leur étude, directement possible sur les cellules et les organismes avec l'enzyme Cas9, va décupler les moyens de mieux connaître le vivant et ses ressorts génétiques. Les retombées pratiques de ce nouvel outil ne devraient pas tarder ; elles suscitent déjà les questions éthiques liées à l'introduction de toute nouvelle technologie.

Dans le domaine des plantes, notamment, les modifications génétiques ciblées par l'enzyme Cas9 pourront bientôt se faire sans insertion d'ADN étranger autre que la séquence désirée dans les génomes, l'enzyme et ses ARN guides étant introduits dans la cellule puis éliminés par elle. Ces nouvelles plantes ne seront donc plus forcément des plantes transgéniques, c'est-à-dire porteuses dans leur génome d'une séquence d'ADN étrangère à leur espèce. Et elles n'auront plus que des modifications limitées et connues de leur génome, bien plus sûres que celles, chimiques, obtenues jusqu'à présent par les semenciers.

Dans le domaine animal, des maladies génétiques pourraient être corrigées. À plus long terme, toute cellule et tout organisme seront susceptibles d'être modifiés en utilisant Cas9, ultime étape de la domestication du vivant engagée par notre espèce il y a plus de 10 000 ans. La puissance et l'accessibilité de ce nouvel outil de manipulation génétique sont déjà en train de changer les pratiques de la recherche et ouvrent un champ d'expérimentation illimité. Une telle révolution devra s'accompagner d'un cadre législatif simple et clair pour éviter toute dérive qui pourrait porter préjudice aux individus, aux êtres vivants ou aux sociétés.

BIBLIOGRAPHIE

D. B. T. Cox *et al.*, **Therapeutic genome editing : prospects and challenges**, *Nature medicine*, vol. 21, pp. 121-131, 2015.

K. Belhaj *et al.*, **Editing plant genomes with CRISPR/Cas9**, *Curr. Opin. Biotech.*, vol. 32, pp. 76-84, 2015.

J. Doudna et E. Charpentier, **The new frontier of genome engineering with CRISPR-Cas9**, *Science*, vol. 346, 1258096, 2014.

P. Hsu *et al.*, **Development and applications of CRISPR-Cas9 for genome engineering**, *Cell*, vol. 157, pp. 1262-1278, 2014.

R. Barrangou et P. Horvath, **CRISPR : new horizons in phage resistance and strain identification**, *Annu. Rev. Food Sci. Technol.*, vol. 3, pp. 143-162, 2012.

MUSÉE DU QUAI BRANLY
là où dialoguent les cultures
L'ETHNOLOGIE EN FÊTE
AU MUSÉE DU QUAI BRANLY
SEPIK, Arts de Papouasie-Nouvelle-Guinée
Exposition · 27/10/15 - 31/01/16
ESTHETIQUES DE L'AMOUR, Sibérie extrême-orientale
Exposition · 03/11/15 - 17/01/16
LA FETE DE LA SCIENCE 07/10/15 - 17/10/15
Conférences · Rencontres · Projections · Visites guidées · Ateliers
Et toute l'année
Expositions · Université populaire du quai Branly ·
Ateliers en famille · Conférences · Colloques scientifiques
www.quaibranly.fr

CRISPR-Cas9 : « Une réflexion éthique s'impose »

Depuis sa mise au point en 2012, l'outil de génétique CRISPR-Cas9 se répand à une telle vitesse et dans des domaines si variés qu'il soulève de nombreuses inquiétudes.

Patrick GAUDRAY, généticien, directeur de recherche au CNRS, est membre du Comité consultatif national d'éthique.

Entretien avec Patrick Gaudray

Mis en évidence chez la bactérie et adapté pour qu'il soit transposable à toute espèce, le système CRISPR-Cas9 permet de modifier une ou plusieurs régions précises du génome de n'importe quelle cellule. Partout dans le monde, des équipes s'emparent de ce nouvel outil et explorent ses possibilités sur des plantes et animaux toujours plus nombreux. Récemment, une équipe de l'université Sun Yat-sen, à Guangzhou en Chine, l'a même testé dans des embryons humains non viables. Comment éviter les dérives ? Toutes les recherches sont-elles acceptables d'un point de vue éthique ? L'éclairage de Patrick Gaudray, généticien du CNRS à l'université François-Rabelais, à Tours, spécialiste de l'instabilité génomique dans les cancers et membre du Comité consultatif national d'éthique.

POUR LA SCIENCE
La technique CRISPR-Cas9 est-elle sûre ?

PATRICK GAUDRAY : En biologie, rien n'est sûr à 100 %. Cette technique présente des risques, comme toute technique. Même si les chercheurs perfectionnent leurs protocoles pour limiter les erreurs, il y aura toujours un risque de créer des mutations dans d'autres endroits du génome, de perturber les interactions du génome avec l'environnement ou d'altérer involontairement des fonctions biologiques. Mais si on se limite à la question « Y a-t-il un risque ? Est-il équilibré par un bénéfice attendu plus important ? », on ne va pas bien loin dans la réflexion éthique. Lorsque Alain Fisher a lancé en 2000 la thérapie génique sur les enfants-bulles à l'hôpital Necker, il savait qu'il y avait un risque. Ce risque a été évalué par de nombreuses personnes qui ont donné des autorisations pour que les expérimentations puissent être faites, et puis il y a eu des problèmes. Sur neuf enfants traités, quatre ont eu une leucémie. Mais les problèmes ont été identifiés, et l'approche a été améliorée et étendue à d'autres maladies. Quelle est la bonne réponse dans ce cas-là ? Fallait-il ne rien tenter à cause du risque ?

PLS
Au-delà du débat bénéfices-risques, où commence vraiment la réflexion éthique sur CRISPR-Cas9 ?

P. G. : CRISPR-Cas9 est un outil extraordinaire qui doit être utilisé, cela ne fait aucun doute. La vraie question est : dans quel contexte ? Il en est un sur lequel nous pouvons nous mettre d'accord : il faut profiter de cette technique dans la recherche fondamentale, qui permet l'acquisition de connaissances nouvelles et qui nous enrichit intellectuellement. Contrairement à certains, je ne pense pas qu'il y ait de tabous dans la connaissance. La technologie CRISPR-Cas9 permet d'accélérer et d'améliorer notre connaissance des mécanismes vivants. Les risques de la technique eux-mêmes peuvent être étudiés pour améliorer la connaissance, notamment sur son fonctionnement. Ensuite, dans certains cas, on peut envisager des applications, notamment sur l'homme. Mais là commencent les problèmes.

PLS
Dans le cas des embryons humains, il est difficile de ne pas imaginer les applications potentielles, thérapeutiques (correction d'une anomalie génétique responsable d'une maladie), mais aussi eugénistes. Faut-il proscrire ces recherches, possibles dans les pays tels la Chine et les États-Unis ?

P. G. : On a fait des procès d'intention à l'équipe de Junjiu Huang, qui a testé CRISPR-Cas9 sur des embryons humains. Son article, pourtant, n'engage pas à grand-chose. Les

AVEC L'OUTIL DE GENETIQUE CRISPR-CAS9, il devient possible, pour toute espèce, de modifier l'ADN d'un embryon (ici un embryon humain au stade quatre cellules) et, ce faisant, le patrimoine génétique de l'individu et de sa descendance.

expériences ont été faites *in vitro*, sur des embryons non viables. Elles ont d'ailleurs montré que l'outil CRISPR-Cas9 est, dans l'utilisation faite ici, beaucoup moins performant qu'on ne le pensait. Le ciblage et la modification du gène ciblé n'ont pas été aussi efficaces qu'espéré. Le protocole était loin d'être idéal, mais en l'améliorant, on pourrait mieux comprendre ce qui se passe quand on modifie un embryon humain.

Il y a certes une part de provocation dans cette publication, mais l'équipe chinoise a le mérite de vouloir faire de la recherche fondamentale. Ce n'est pas avec un procès d'intention qu'on fera avancer ni la réflexion éthique ni la science. Les barrières ne sont d'ailleurs pas forcément mises au bon endroit. En France, l'expérimentation sur les embryons humains est interdite, mais il sera bientôt possible de transformer des cellules somatiques (non reproductrices) en cellules germinales (reproductrices) en les reprogrammant. Peut-on donc tout faire avec des cellules parce qu'elles ne sont pas, au départ, reproductrices ? La réflexion éthique doit être vigilante et pertinente, sans être un frein aux avancées scientifiques, une réflexion de valeur, utile et fondée afin que les développements technologiques ne soient pas mis en application dans n'importe quelles conditions.

PLS

Dans quel cas serait-il éthiquement acceptable de modifier des embryons humains ?

P. G. : La réponse ne peut être que le fruit d'un débat. Est-il éthiquement admissible de modifier des embryons ? Certains, tel le comité d'éthique britannique – l'Autorité britannique sur la fécondation humaine et l'embryologie (HFEA) –, soutiennent que non. Pourtant, l'organisme a quand même émis un avis, aujourd'hui décliné dans la loi anglaise, qui permet, pour résoudre des problèmes médicaux correspondant à des maladies mitochondriales, de faire un transfert de mitochondries. Les mitochondries sont des petites structures cellulaires contenant de l'ADN. L'ADN mitochondrial de l'embryon provient intégralement de l'ovule, donc de la mère. Pour la HFEA, quand on change l'ADN mitochondrial, on ne modifie pas génétiquement l'embryon ni le patrimoine génétique des générations futures, alors qu'objectivement c'est ce qui est fait. On ignore encore tellement de choses sur les relations fonctionnelles entre l'ADN mitochondrial et l'ADN nucléaire ! La HFEA a considéré que le problème médical à résoudre était le plus important, mais on peut ne pas être d'accord.

En fait, dès qu'on commence à vouloir toucher au patrimoine génétique d'espèces vivantes, la question se pose. Et peut-être plus encore avec CRISPR-Cas9 qui, par exemple, permet de modifier les plantes en laissant peu ou pas de traces, contrairement à la transgenèse actuellement utilisée pour produire les plantes génétiquement modifiées, où l'on introduit un ou plusieurs gènes étrangers.

PLS

En avril dernier, Valentino Gantz et Ethan Bier, de l'université de Californie à San Diego, ont montré qu'il est possible de combiner, chez la mouche drosophile, l'outil CRISPR-Cas9 à une technique *(gene-drive)* qui accélère la propagation, dans la descendance, de la mutation produite. Même si les modifications restaient traçables, leur accélération ne risque-t-elle pas d'altérer les écosystèmes, si elles se répandent dans la nature ?

P. G. : Altérer, je ne sais pas, mais modifier, c'est certain. Nous le faisons depuis que nous « domestiquons » la nature. Cela interroge notre réflexion sur notre responsabilité dans l'utilisation que nous en faisons et sur les conditions dans lesquelles elle se fait.

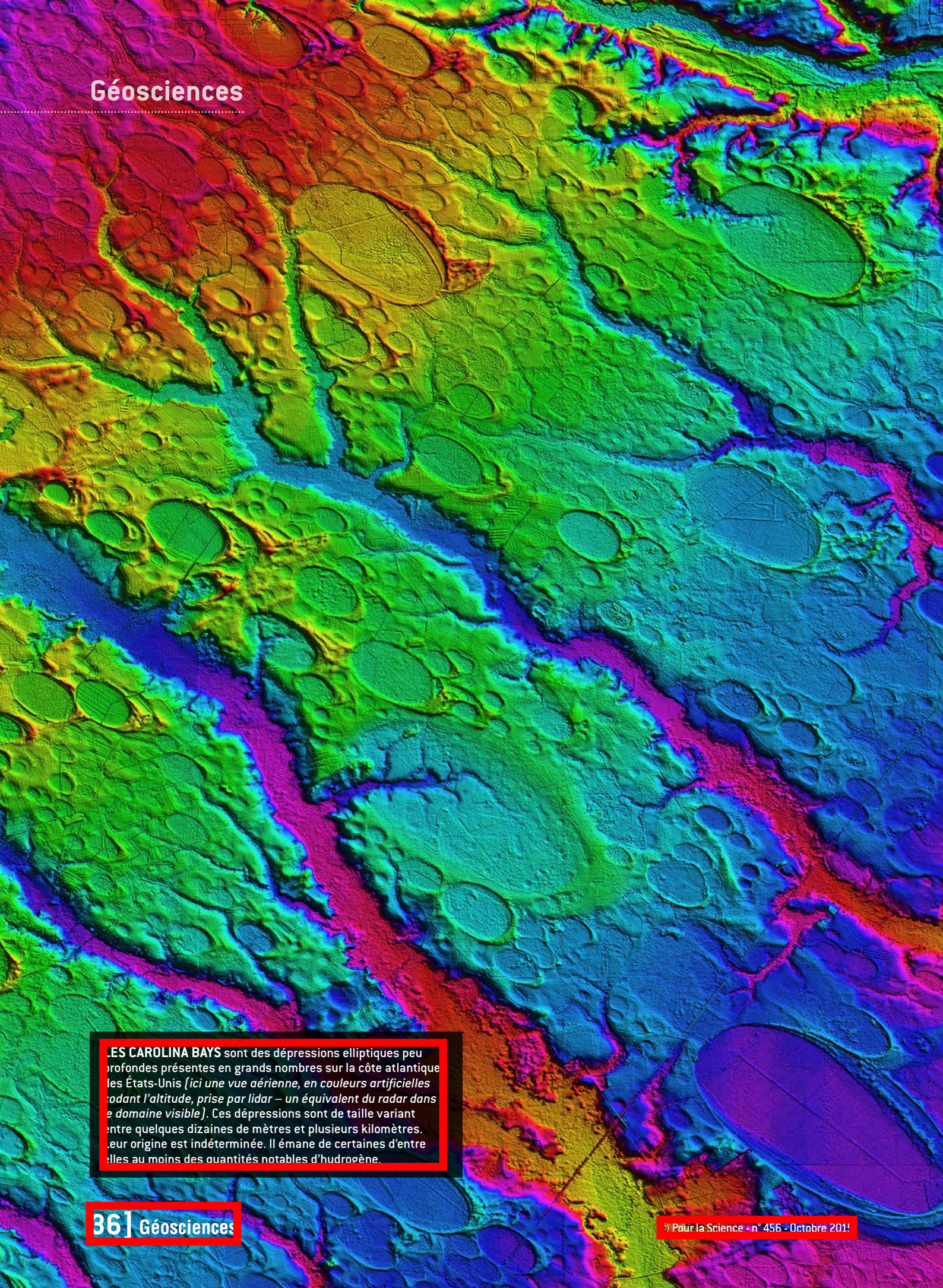
PLS

Qu'est-ce qui pourrait faire avancer les choses ?

P. G. : Il faut des débats publics permanents qui ne soient pas confisqués par des scientifiques, technologues, économistes ou financiers, ni même par ceux qui se prétendent éthiciens. Arrêtons de prendre les gens pour des idiots. Ils ont tout le bagage de réflexion nécessaire pour poser de vraies questions. Le débat public devrait d'ailleurs être appris dès l'école.

Je ne pense pas que des instances de régulation extérieures au monde scientifique ou, pire encore, internes, puissent prendre en compte l'intégralité de la réflexion nécessaire sur la place à donner à telle technologie. Lors du sommet international de bioéthique BEINGS 2015, en mai dernier, il y a eu un consensus des scientifiques sur CRISPR-Cas9 pour dire que c'est un outil formidable avec lequel on ne va faire que des bonnes choses tant qu'on ne touche pas à la lignée germinale humaine. Pourtant, la situation n'est pas aussi simple. Même si on s'interdit de modifier cette lignée, rien ne certifie que des expériences ne la changeront pas quand même. Et on ne peut faire l'impasse sur les nombreux enjeux financiers et économiques de cette nouvelle technologie.

Propos recueillis par Marie-Neige CORDONNIER



LES CAROLINA BAYS sont des dépressions elliptiques peu profondes présentes en grands nombres sur la côte atlantique des États-Unis *(ici une vue aérienne, en couleurs artificielles codant l'altitude, prise par lidar – un équivalent du radar dans le domaine visible)*. Ces dépressions sont de taille variant entre quelques dizaines de mètres et plusieurs kilomètres. Leur origine est indéterminée. Il émane de certaines d'entre elles au moins des quantités notables d'hydrogène.

De l'hydrogène naturel sous nos pieds

Les géologues ont découvert en plusieurs sites continentaux de par le monde des émissions d'hydrogène en quantités importantes. Une prochaine révolution énergétique se profile-t-elle ?

Alain Prinzhofer et Eric Deville

Il y a un peu plus de deux ans, un communiqué de presse de l'IFPEN (Institut français du pétrole et des énergies nouvelles) provoquait un minidéferlement médiatique dans le monde de la vulgarisation scientifique : on y apprenait que de l'hydrogène est émis non seulement au fond des océans – on le savait depuis les années 1970 par les travaux de l'Ifremer – et dans certaines chaînes de montagnes, mais aussi en plein milieu des continents. En outre, on avait déjà trouvé des gisements de ce gaz combustible, sans les avoir cherchés. En trouver d'autres, cette fois en les cherchant, semblait donc un pari prometteur. De fait, nos recherches effectuées en collaboration avec une équipe russe suggèrent que les sites où de l'hydrogène s'échappe du sol sont très nombreux sur les continents.

De l'hydrogène gazeux présent sur Terre en abondance, sans avoir à le fabriquer ? Si tel est bien le cas, le secteur de l'énergie pourrait être bouleversé. Ce n'est pas tous les jours qu'une nouvelle source d'énergie se révèle, et une telle découverte embarrasse les décideurs. En effet, lancer de grands programmes de recherche et développement sur un sujet pionnier, comme l'est celui de l'hydrogène naturel, est risqué : le succès pourrait ne pas être au rendez-vous (mais si on

L'ESSENTIEL

- L'hydrogène utilisé aujourd'hui est produit à partir d'hydrocarbures ou par électrolyse de l'eau, et ne constitue donc pas une source d'énergie.
- Des émissions naturelles d'hydrogène ont été découvertes récemment dans plusieurs régions continentales.
- De tels sites d'émission, où le flux d'hydrogène est important, semblent nombreux.
- Des études sont nécessaires pour évaluer la possibilité d'exploiter industriellement cet hydrogène naturel, qui pourrait constituer une source d'énergie.

connaissait, avant de lancer un programme de recherche, son résultat final, la recherche n'existerait plus...).

Par ailleurs, après bientôt deux siècles de dépendance vis-à-vis des énergies fossiles (charbon et pétrole), envisager de nouvelles structures techniques et sociétales pour y intégrer l'hydrogène naturel est un défi. Il est plus aisé d'exploiter de vieilles sources d'énergie (le soleil, le vent) avec des technologies d'aujourd'hui (panneaux photovoltaïques, éoliennes)...

L'hydrogène qui nous occupe ici se réfère au composé gazeux H_2, plus proprement nommé dihydrogène, et dont les molécules sont l'association de deux atomes d'hydrogène au sens strict, l'élément le plus abondant de l'Univers. La découverte de gisements d'hydrogène laisse-t-elle espérer un meilleur avenir énergétique pour l'humanité ? Nous allons tenter de faire le point sur cette question, mais il faut bien garder à l'esprit que si l'on n'entreprend pas de recherches pour approfondir nos connaissances, l'hydrogène n'a aucune chance de devenir une source significative d'énergie.

Précisons pour commencer que le marché industriel de l'hydrogène est aujourd'hui bien plus important qu'on ne l'imagine : son chiffre d'affaires dépasse les 100 milliards de dollars par an dans le monde. Le volume d'hydrogène que nous consommons, principalement dans les raffineries et dans l'industrie de l'ammoniac, correspond à environ 22 % de la consommation de « gaz naturel » (terme qui désigne, de façon simplifiée et abusive, le méthane extrait du sous-sol).

Cependant, cet hydrogène est en totalité fabriqué par l'homme, et ce à 94 % à partir d'énergies fossiles (méthane, pétrole, charbon), le reste par hydrolyse. Son coût est très élevé, tant sur le plan financier que sur le plan environnemental : à énergie égale, il coûte environ cinq fois plus que le pétrole, et pour un kilogramme d'hydrogène fabriqué, on libère dix kilogrammes de dioxyde de carbone (CO_2). De plus, le rendement énergétique de sa production est inférieur à celui de la combustion directe des ressources hydrocarbonées fossiles servant à la fabriquer.

Par conséquent, aujourd'hui, rouler à l'hydrogène signifie polluer et consommer davantage que lorsqu'on roule aux carburants classiques, hydrocarbonés. C'est pourquoi l'emploi de l'hydrogène comme carburant reste depuis des décennies un rêve peu développé, même si Toyota vient de lancer le premier modèle industriel de voiture à hydrogène (la *Mirai*).

Cette situation pourrait changer dans un proche avenir, pour deux raisons. D'une part, l'augmentation de la part des énergies renouvelables (photovoltaïque, éolienne) exige un stockage de l'électricité produite, ces sources d'énergie étant intermittentes. On ne sait pas stocker de grandes quantités d'électricité. En revanche, on peut facilement transformer l'électricité en hydrogène, grâce à l'électrolyse ; et la transformation inverse, d'hydrogène en électricité, se fait aussi sans problème majeur avec des piles à combustible (inventées en 1842 !). On envisage donc d'utiliser l'équivalence électricité-hydrogène pour suivre la demande énergétique avec la même souplesse qu'avec les énergies fossiles « de stock », sans souffrir du bon vouloir du soleil ou du vent.

D'autre part, on peut maintenant considérer l'hydrogène non simplement comme un *vecteur* d'énergie (une forme utilisable d'énergie produite par l'homme à partir d'une autre source), mais aussi comme une *source* d'énergie, produite directement par la nature. C'est tout l'enjeu de l'hydrogène naturel qui est, comme nous le verrons, produit par la Terre en quantités importantes et dans de nombreux endroits.

Des gisements qui semblent bien répartis

Cette nouvelle source d'énergie pourrait changer les structures de nos sociétés, fondées depuis les révolutions industrielles sur les énergies fossiles de stock. L'exploitation du pétrole, des hydrocarbures gazeux ou du charbon a un caractère centralisé, l'extraction de ces ressources n'étant possible qu'en un nombre limité de lieux inégalement répartis à la surface du globe. Au contraire, l'hydrogène naturel semble réparti à peu près partout, son exploitation telle qu'on l'imagine aujourd'hui pourrait se faire avec des forages peu profonds (plus proches des forages à eau que des forages pétroliers), et l'on peut envisager son utilisation sans avoir à le raffiner. Rappelons aussi que la consommation d'hydrogène n'est pas polluante, puisque sa combustion (la réaction $2\,H_2 + O_2 \rightarrow 2\,H_2O$) ne produit que de l'eau.

Que sait-on de l'hydrogène naturel ? Des émissions d'origine souterraine de ce gaz sont avérées depuis les années 1970 au moins. Mais il s'agissait de curiosités

LES AUTEURS

Alain PRINZHOFER est directeur scientifique de la société GEO4U, au Brésil, et professeur associé à l'Institut de physique du globe de Paris et au Laboratoire interdisciplinaire des énergies de demain, à Paris.

Eric DEVILLE est géologue à l'IFPEN (Institut français du pétrole et des énergies nouvelles) et professeur à IFP School, à Rueil-Malmaison.

géologiques : soit les émissions d'hydrogène étaient localisées au fond des océans, sur les sites hydrothermaux des rides médio-océaniques (sous des milliers de mètres d'eau et dans des contextes très hostiles et corrosifs, *voir la figure ci-contre*), soit leurs flux étaient trop faibles pour que l'on imagine un intérêt industriel.

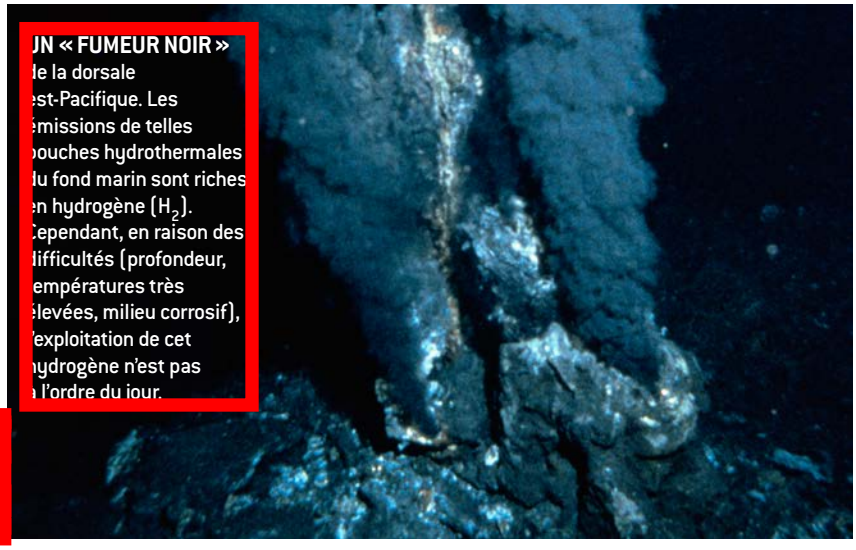
Des travaux récents, encore modestes, montrent que la Terre produit et émet des quantités d'hydrogène bien plus importantes qu'on ne le pensait, et ce dans des lieux très accessibles sur les principaux continents. Sur le plan géologique, on peut décrire deux grands types de gisements : ceux des formations ophiolitiques (lambeaux de lithosphère océanique coincés dans des chaînes de montagnes, dans des zones de subduction, là où une plaque lithosphérique plonge sous une autre), et ceux situés dans des zones cratoniques, c'est-à-dire au cœur des continents anciens.

L'hydrogène émis sur les rides médio-océaniques et dans les formations ophiolitiques a déjà été beaucoup étudié, et les mécanismes de sa genèse sont assez bien cernés. En revanche, la connaissance et l'exploration de l'hydrogène continental, dont les quantités et les flux semblent plus importants, restent très préliminaires.

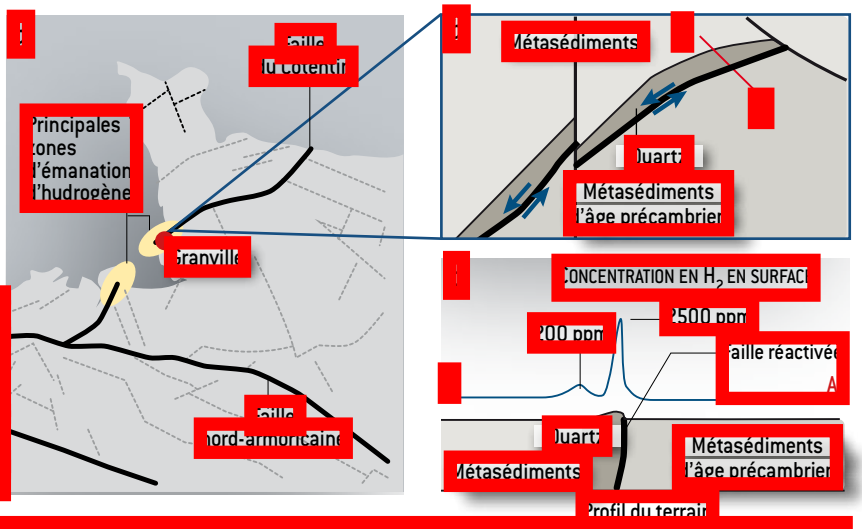
On peut comparer cette situation avec celle du pétrole, utilisé industriellement depuis le milieu du XIX^{e} siècle, alors que les premiers travaux scientifiques cohérents sur l'origine du pétrole ne datent que des années 1930. Il n'est donc pas déraisonnable d'imaginer que l'humanité sera capable de récupérer et d'utiliser l'hydrogène naturel même si les mécanismes de sa genèse et de sa migration dans le sous-sol sont encore mal compris.

Une origine géologique encore mal identifiée

L'hydrogène océanique et ophiolitique a été étudié par le monde académique pour deux raisons. D'une part, il s'agit de comprendre les processus géochimiques dont il est issu et qui font partie du fonctionnement de la Terre, vue comme un grand réacteur chimique animé de mouvements de convection (remontées par poussée d'Archimède de matière chaude, plongées de matière froide). D'autre part, cet hydrogène est considéré comme l'une des briques essentielles à l'origine et à l'évolution initiale de la vie sur Terre. En effet, on



UN « FUMEUR NOIR » de la dorsale est-Pacifique. Les émissions de telles bouches hydrothermales du fond marin sont riches en hydrogène (H_2). Cependant, en raison des difficultés (profondeur, températures très élevées, milieu corrosif), l'exploitation de cet hydrogène n'est pas à l'ordre du jour.



DES EMISSIONS D'HYDROGENE, liées à des failles, ont été repérées dans le nord-ouest de la France *(a)*. L'étude de la faille de Granville *(b et c, selon la direction AA')* a montré que celle-ci, cimentée par un filon de quartz épais d'environ 50 mètres, laisse fuir de l'hydrogène aux bordures du filon. Les flux les plus importants sont associés à la bordure sud-est, probablement en raison d'une fracturation plus intense du quartz au contact des métasédiments d'âge précambrien.

UNE VUE SATELLITAIRE DE LA REGION DE BORISSOGLEBSK, en Russie, à environ 500 kilomètres au sud de Moscou. On distingue de nombreuses dépressions circulaires qui correspondent à des centres d'émanation d'hydrogène naturel.

sait aujourd'hui qu'avant l'apparition de a photosynthèse (et donc l'utilisation de 'énergie solaire par les organismes biolo- giques), l'unique source d'énergie acces- sible aux êtres vivants était l'hydrogène.

Quelle est l'origine de l'hydrogène océanique et ophiolitique ? L'explication privilégiée aujourd'hui par les scientifiques est l'altération des principales roches dont est constituée la lithosphère océanique, es péridotites. Le minéral majoritaire de es roches est l'olivine, qui contient du fer ferreux (des ions Fe^{2+}). Or l'olivine s'altère facile- ment par interaction avec de l'eau chaude, due à l'hy- drothermalisme des rides médio-océaniques ou juste à l'augmentation de tempé- rature avec la profondeur. Le fer ferreux est alors solubilisé dans 'eau, et une réaction d'oxydo-réduction e produit : le fer ferreux s'oxyde en fer ferrique (Fe^{3+}), tandis que l'eau se réduit en ydrogène moléculaire, H_2. Cette réaction ien connue (réaction dite de serpentini- ation) peut avoir lieu par voie chimique i les températures le permettent, ou par oie biologique dans les formations plus uperficielles, donc plus froides.

L'origine de l'hydrogène découvert en milieu continental est en revanche encore mal identifiée et fait l'objet de plusieurs hypothèses en concurrence. Quoi qu'il en soit, les roches associées sont soit des for- mations sédimentaires, soit des formations plutoniques (granites ou gneiss). Et le pre- mier guide de prospection est la présence de dépressions circulaires, de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres de diamètre, profondes de quelques dizaines de centimètres, voire quelques mètres, qui peuvent apparaître en moins de deux ans seulement *(voir les figures pages 39 et 42)*.

Des dépressions circulaires associées à des émissions d'hydrogène peuvent se créer en moins de deux ans.

Ces dépressions pourraient être dues à la perte d'eau, transformée en hydrogène qui s'échappe du sous-sol *(voir plus bas)*, ce qui provoque un effondrement de ter- rain. Au sein de telles dépressions, on a pu mesurer des flux importants d'hydrogène : plusieurs dizaines de milliers de mètres cubes par jour et par structure (alors qu'à l'extérieur de ces structures, aucun flux n'est mis en évidence).

Pour expliquer l'émission d'hydro- gène naturel, Nikolay Larin, de l'institut Schmidt de physique de la Terre à Moscou, et ses collègues avancent que l'hydrogène serait profond, primordial, piégé dans des hydrures métalliques (structures cristallines combinant des atomes d'hydrogène et de métal) au sein du noyau terrestre ; cet hydrogène se libérerait peu à peu et migre- rait jusqu'à la surface au cours des temps

Des émanations d'hydrogène un peu partout sur les continents

Au cours des dernières décennies, plusieurs découvertes sporadiques de sites d'émission de gaz riche en hydrogène ont eu lieu, par exemple dans l'est du nord-ouest de la Russie et dans le cratère d'impact météoritique de Silian, en Suède, dans les années 1980.

Des découvertes ont aussi eu lieu dans des mines de charbon en Afrique du Sud et au centre du Mali (gisement qui alimente depuis deux ans un petit généra- teur d'électricité et qui fait par ailleurs l'objet d'un projet d'ex- ploitation), etc.

Mais la mise en évidence de flux importants d'hydrogène s'échappant de la croûte conti- nentale aura lieu bien plus tard, en Russie. En 2005, le géologue russe Nikolay Larin et son père Vladimir découvrent que de l'hydrogène émane d'une dépression à peu près circulaire située dans le craton (partie très ancienne et stable de la croûte continentale) européen.

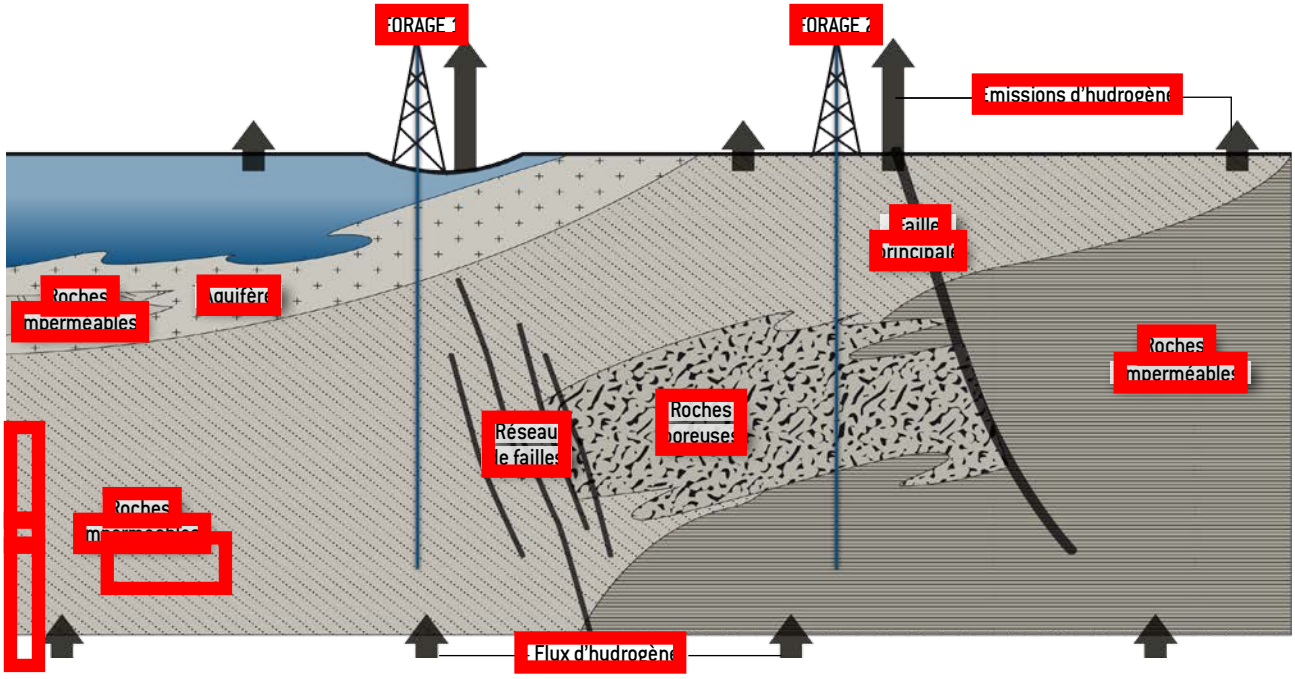
Depuis, quelques dizaines de dépressions similaires, dont il existe plusieurs milliers entre la région de Moscou et le Kazakhstan, ont été étudiées par Nikolay Larin et ses collè- gues, avec à chaque fois des émissions d'hydrogène en quantité significative. Après les premières découvertes de l'équipe russe, avec laquelle nous avons commencé à colla- borer en 2010, nous avons entrepris de repérer, à l'aide des images de GoogleEarth, d'autres dépressions analogues dans le monde, afin d'étudier leurs flux d'hydrogène.

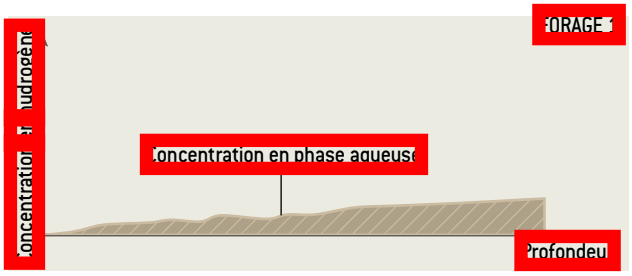
C'est ainsi que, avec Kath- leen Farell, du Service géologique de la Caroline du Nord, nous avons étudié quelques-unes des innombrables dépressions ellip- tiques de la région dite des Caro- lina Bays, avec des résultats similaires à ceux de l'étude des dépressions russes.

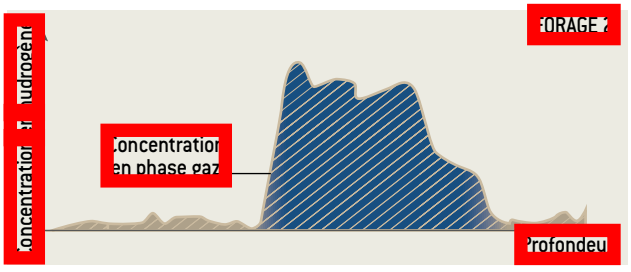
Bien d'autres endroits dans le monde présentent des dépressions de même morphologie. Il reste à les étudier pour déterminer lesquelles sont associées à des émissions d'hydrogène et lesquelles relèvent d'autres phénomènes géologiques (dolines formées par la dissolu- tion de calcaires ou d'évaporites peu profonds, effondrements dus à la fonte d'une lentille de glace dans un pergélisol, etc.).

Enfin, il faut souligner que les émissions d'hydrogène ne concernent pas que des dépres- sions circulaires : on peut les trouver dans les fractures de roches de surface très durcies, comme en témoignent les sites d'émission au Kansas ou ceux récemment mis en évidence dans l'ouest de la France.

A. P. et E. D.







SCHÉMATISATION D'UNE ZONE GÉOLOGIQUE où un flux profond d'hydrogène s'achemine vers la surface, avec deux cas de figure distincts. Dans le cas du forage 1, l'hydrogène reste en solution dans l'eau des aquifères, migre uniquement par diffusion en milieu aqueux, avec des concentrations qui diminuent dans les zones plus superficielles et restent toujours modestes. Dans le cas du forage 2, un contraste d'imperméabilité permet à l'hydrogène de se concentrer et de se désorber de l'eau qui le contient, formant des bulles de gaz qui remontent par poussée d'Archimède et conduisent à une accumulation sitoire d'hydrogène, *a priori* facile à exploiter. Le forage 1 serait ctéristique du Kansas, tandis que le forage 2 représenterait ce que on croit savoir des accumulations découvertes au Mali.

géologiques. Cette hypothèse est problématique, étant donné la longue remontée de l'hydrogène à travers les roches (des oxydes) du manteau terrestre. Il nous est difficile d'imaginer que les molécules H_2, très réactives, parviendraient jusqu'à la surface sans s'être chimiquement liées à d'autres éléments ou composés.

Plusieurs hypothèses

Une autre explication invoque la radiolyse de l'eau, c'est-à-dire la décomposition des molécules d'eau sous l'effet de la radioactivité naturelle, due à l'uranium en particulier. Ce phénomène a été mis en évidence, par exemple, dans des formations géologiques du Gabon datant de deux milliards d'années, et il est bien documenté. Cependant, il nous semble qu'aujourd'hui, les teneurs résiduelles des roches en uranium radioactif ne contribueraient que marginalement à la production d'hydrogène.

L'hypothèse que nous privilégions pour la genèse de l'hydrogène continental n'est pas très éloignée de l'interprétation de l'hydrogène océanique : il s'agirait d'une réduction de l'eau par un métal susceptible de s'oxyder. L'élément chimique le plus abondant pouvant convenir est le fer, car il a plusieurs degrés possibles d'oxydation : comme on l'a vu plus haut, entre la forme métallique, qui n'existe à l'état naturel sur Terre qu'au sein du noyau de la planète et dans les rares météorites de fer, et le fer ferrique, ou Fe^{3+}, bien connu sous forme de « rouille », il existe une troisième forme intermédiaire d'oxydation du fer, le fer ferreux, ou Fe^{2+}. La déstabilisation d'un minéral contenant du fer ferreux rend possible une réaction où l'eau se réduit en H_2 tandis que le fer devient ferrique.

Il reste à trouver, dans la croûte continentale, des minéraux contenant du fer ferreux et qui peuvent, par enfouissement, donc sous l'effet de l'augmentation de température et de pression, se déstabiliser et libérer du fer ferreux dans les eaux souterraines. L'un de ces minéraux vient d'être étudié par Vincent Milesi, de l'Institut de physique du globe de Paris, et ses collaborateurs. Il s'agit d'un minéral à base de carbonate de fer ($FeCO_3$) nommé sidérite. Il se déstabilise à relativement basse température (vers 200 °C), et il ne contient que du fer ferreux, qui peut alors réduire l'eau pour produire de l'hydrogène (selon la réaction $3\,FeCO_3 + H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + 3\,CO_2 + H_2$). Cependant, bien d'autres minéraux sont envisageables, même si les études expérimentales restent à faire : chlorites ferreuses, pyroxènes, amphiboles, micas, etc.

L'hydrogène continental a été découvert à ce jour dans presque tous les continents : en Russie, aux États-Unis (au Kansas et en Caroline du Nord, où des structures circulaires émettent également de l'hydrogène, *voir la figure pages 36-37*), au Brésil, au Mali, et même dans l'ouest de la France *(voir la figure page 39)*. Mais pour l'instant, seuls deux endroits au monde (au Mali et au Kansas américain) ont fait l'objet de forages en vue de récupérer ce gaz.

Les autres localités ont surtout été soumises à des d'études géochimiques

DES DEPRESSIONS associées à des émissions d'hydrogène peuvent se former en peu de temps. En témoignent ces images du site d'Elektrostal, à l'est de Moscou, prises par satellite. En 2002, aucune structure ne peut être détectée dans le couvert végétal (forêt). En 2004, une structure circulaire d'environ 180 mètres de diamètre apparaît, avec la mort concomitante des arbres situés dans ce cercle. Des émanations d'hydrogène y ont été mesurées.

de surface : mesures de concentrations d'hydrogène dans les sols à environ un mètre de profondeur, afin de déterminer des flux d'émission dans l'atmosphère. Il faut bien avoir à l'esprit que ce gaz, très réactif et très mobile, ne peut être étudié et compris de la même manière que le méthane. Il ne s'agit pas d'un gaz fossile, accumulé pendant les temps géologiques qui se comptent en millions d'années, mais d'un gaz produit avec le même flux que celui de son émission dans l'atmosphère. Les flux d'émission mesurés par ces campagnes de géochimie de surface représentent donc les flux que l'on espère récupérer lors d'une future exploitation, et ce de façon durable, sans épuiser un quelconque gisement.

Des accumulations possibles

Est-ce à dire qu'il n'existe pas d'accumulations d'hydrogène gazeux ? L'exemple du Mali, où une telle accumulation a été découverte par hasard dans les années 1970, à l'occasion d'un forage à eau, montre qu'elles existent, et que l'on en trouvera sans doute ailleurs. Toute accumulation dans le sous-sol, de pétrole, de méthane ou d'hydrogène *(voir la figure page 41)*, est une accumulation transitoire, comme un embouteillage sur une autoroute : la diminution de la vitesse de chaque élément (molécules ou voitures) entraîne une densification de ces éléments à l'endroit du ralentissement (donc une accumulation), mais le flux se poursuit malgré tout , et les voitures finissent par arriver à leur destination, comme les molécules de gaz finissent par se disperser dans l'atmosphère.

Ce qui compte est le temps caractéristique de l'accumulation – quelques heures pour un embouteillage, des millions d'années pour les hydrocarbures, et sans doute quelques années ou décennies pour l'hydrogène naturel. À l'échelle humaine, on parle donc d'énergies fossiles pour les hydrocarbures, d'énergie de flux pour l'hydrogène, mais chacune de ces expressions est une simplification correspondant à une échelle de temps différente.

Où peut-on espérer trouver des émissions d'hydrogène continental ? Nous avons constaté que la proximité de grandes failles profondes, anciennes mais pouvant rejouer récemment, est un guide très performant. Dans l'ouest de la France, où l'on ne peut espérer détecter des dépressions circulaires en raison de la forte présence d'activités humaines, nous avons ainsi mesuré en mai 2015 des flux d'hydrogène naturel du même ordre qu'au sein des dépressions, le long de grandes failles du domaine nord-armoricain, près de Granville et de la pointe du Grouin *(voir la figure page 39)*. Dans d'autres régions où les dépressions circulaires restent visibles (terrain meuble et absence d'activités humaines ou de forêt), on observe que ces structures s'alignent, à l'échelle d'un continent, sur les grands accidents tectoniques déjà cartographiés.

Récapitulons les trois types de sources d'hydrogène naturel. Il y a d'abord les fonds océaniques, dont l'intérêt industriel reste lointain. Viennent ensuite les sources associées aux ophiolites. Bien qu'elles soient beaucoup plus accessibles que les fonds marins, leurs flux sont modestes et liés à des formations rocheuses peu aisées à exploiter : zones montagneuses, roches imperméables

BIBLIOGRAPHIE

A. Prinzhofer et É. Deville, **Hydrogène naturel - La prochaine révolution énergétique ?**, Belin, 2015.

É. Deville et A. Prinzhofer, **L'hydrogène naturel : une source potentielle d'énergie propre et renouvelable,** *Géologues*, n° 185, pp. 105-110, 2015.

V. Milesi *et al.*, **Formation of CO_2, H_2 and condensed carbon from siderite dissolution in the 200-300 °C range and at 50 Mpa,** *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 154, pp. 201-211, 2015.

N. Larin *et al.*, **Natural molecular hydrogen seepage associated with surficial, rounded depressions on the European craton in Russia,** *Natural Resources Research*, publié en ligne le 15 novembre 2014.

ét dépourvues de porosité ne permettant pas au gaz de s'accumuler temporairement). Les sources situées au cœur des vieux continents, enfin, sont les plus prometteuses : leurs flux sont les plus intenses, leur accessibilité est optimale et, qui plus est, on sait que dans les rares cas étudiés par forage, il existe des accumulations transitoires pouvant être exploitées sans que l'on ait à récupérer les flux en surface, opération techniquement plus délicate.

Des études nécessaires

Ainsi, nous savons maintenant que l'hydrogène existe dans la nature en quantités suffisantes pour envisager une production de ce qui représentera une nouvelle source d'énergie. Nous avons pu définir, en particulier en milieu intracontinental, quelques guides de prospection : les dépressions circulaires, les grandes failles. Mais de nombreuses questions demeurent. Comment récupérer efficacement cet hydrogène ? Comment en repérer des accumulations, plus facilement exploitables ? Quels sont ses flux, de manière plus quantitative ? Quels sont les meilleurs moyens de prospection ? Les flux de surface pourront-ils alimenter une production industrielle d'hydrogène ?

Toutes ces questions sont ouvertes aujourd'hui, et seuls des efforts pluridisciplinaires de recherche et développement permettront d'y répondre assez précisément – même si certains sites pilotes, au Kansas et au Mali, sont déjà en état de produire des petites quantités d'hydrogène.

On l'a vu, l'exploitation de l'hydrogène naturel présenterait de nombreux avantages environnementaux. Mais cette perspective pourrait se heurter à des obstacles tels que des lobbies industriels présents sur d'autres niches du marché énergétique, ou les changements d'organisation de nos sociétés que cette énergie décentralisable nécessiterait. L'humanité aura-t-elle le désir d'explorer plus avant le potentiel de l'hydrogène naturel afin de déterminer si les promesses d'aujourd'hui peuvent devenir réalité ou si cette source d'énergie ne pourra être que marginale ? Ce n'est qu'en investissant et en travaillant sur ce sujet que nous saurons si l'hydrogène naturel fera ou non partie de l'aventure humaine.

De l'hélium aussi

L'hélium, gaz qui s'est révélé être présent en quantités exploitables pour la première fois en 1903 (avec le forage de Dexter au Kansas), constitue aujourd'hui un marché important et stratégique, principalement en lien avec l'électronique. Or les rares gisements d'hydrogène naturel étudiés en milieu continental présentent des concentrations d'hélium supérieures à celles de la plupart des gisements de méthane, l'unique source de l'hélium produit aujourd'hui. Les concentrations associées à l'hydrogène continental sont d'environ 1 à 2 %, soit trois à six fois supérieures au seuil à partir duquel une exploitation industrielle est rentable. L'hélium contribuerait donc aussi à valoriser l'exploitation de l'hydrogène naturel.

L'étonnante plasticité du cerveau adolescent

Jay Giedd

À l'adolescence, le cerveau humain se reconfigure très vite. Ces transformations sont une source de risques, mais aussi d'avancées fulgurantes en matière de cognition et d'adaptabilité.

Les mots « cerveau » et « adolescent » vous semblent contradictoires ? La plaisanterie est commune. Certains neuroscientifiques sont allés jusqu'à expliquer les comportements risqués, agressifs ou déconcertants des adolescents comme la conséquence d'un cerveau dysfonctionnel.

C'est pourtant à une tout autre conclusion que sont parvenues les recherches des dix dernières années. Le cerveau des adolescents n'est pas défectueux. Ce n'est pas non plus un cerveau adulte à moitié fini. Il a été façonné par l'évolution pour fonctionner différemment de celui d'un enfant ou d'un adulte.

Tout d'abord, le cerveau des adolescents est étonnamment modifiable. Il reconfigure ainsi ses réseaux de communication internes pour répondre aux défis auxquels il est confronté. Cette souplesse particulière, ou plasticité, est une arme à double tranchant. Elle permet aux adolescents d'effectuer des progrès fulgurants dans le domaine de la pensée et de la socialisation, mais elle les expose aussi à des comportements dangereux et à des troubles mentaux graves, du fait de la transformation continuelle de leur cerveau.

Les études récentes indiquent que la tendance des adolescents à prendre des risques résulte d'une différence de maturité entre deux régions majeures du cerveau : d'une part, le système limbique, qui donne naissance aux émotions et qui parvient vite à un stade très actif après la puberté, et, d'autre part, le cortex préfrontal, impliqué dans le jugement et le contrôle des impulsions mais qui n'arrive à maturité que plus tardivement. Cette dernière région subit en effet des modifications importantes au moins jusqu'à l'âge de 20 ans.

Mieux comprendre ce décalage peut aider les parents, les enseignants, les conseillers – et les adolescents eux-mêmes – à dédramatiser. Des comportements tels que la prise de risque, la recherche de sensations fortes et l'éloignement de ses parents pour se rapprocher de ses semblables ne traduisent pas des problèmes cognitifs ou émotionnels. Ils résultent du développement normal du cerveau et sont une composante ordinaire de l'apprentissage des adolescents.

L'ESSENTIEL

- Des études par IRM montrent que le cerveau adolescent a une capacité étonnante à reconfigurer ses connexions internes pour s'adapter à son environnement.
- Les adolescents ont des comportements à risque car leur système limbique, impliqué dans les émotions, se développe plus tôt que leur cortex préfrontal, qui contrôle les impulsions.
- Mieux comprendre leur cerveau aiderait à interagir avec eux et à distinguer les comportements normaux et pathologiques.

L'AUTEUR

Jay GIEDD dirige le département de psychiatrie de l'enfant et de l'adolescent à l'université de Californie à San Diego, aux États-Unis. Il est aussi professeur à l'université Johns Hopkins et rédacteur en chef de la revue *Mind, Brain, and Education*.

Quand une fille de 15 ans se démarque des goûts vestimentaires, musicaux ou politiques de ses parents, ce n'est pas le signe d'une maladie mentale. De même, lorsqu'un garçon de 16 ans saute sur sa planche à roulettes sans casque ou relève des défis absurdes lancés par ses amis, le risque ne doit pas être sous-estimé, mais il résulte plutôt d'un manque de réflexion et de la pression de ses semblables que d'un désir de se blesser.

En revanche, d'autres agissements sont plus inquiétants, notamment quand ils sont empreints d'agressivité. Une meilleure connaissance du cerveau des adolescents aidera à différencier un comportement pathologique d'un autre qui nous semble inhabituel, mais qui est normal pour cet âge. Ainsi, nous pourrons sans doute atténuer les multiples difficultés auxquelles ils sont confrontés : addictions, maladies sexuellement transmissibles, accidents de la route, grossesses non désirées, homicides, dépressions, suicides...

Certains parents sont surpris d'entendre que le cerveau d'un jeune de 16 ans n'est pas identique à celui d'un enfant de 8 ans. Les chercheurs ont d'ailleurs eu du mal à identifier les différences. Enveloppé d'une membrane solide comme du cuir, baignant dans un liquide protecteur et entièrement entouré d'os, le cerveau est bien protégé contre les chutes, les attaques de prédateurs... et la curiosité des scientifiques !

L'IRM dévoile le cerveau adolescent

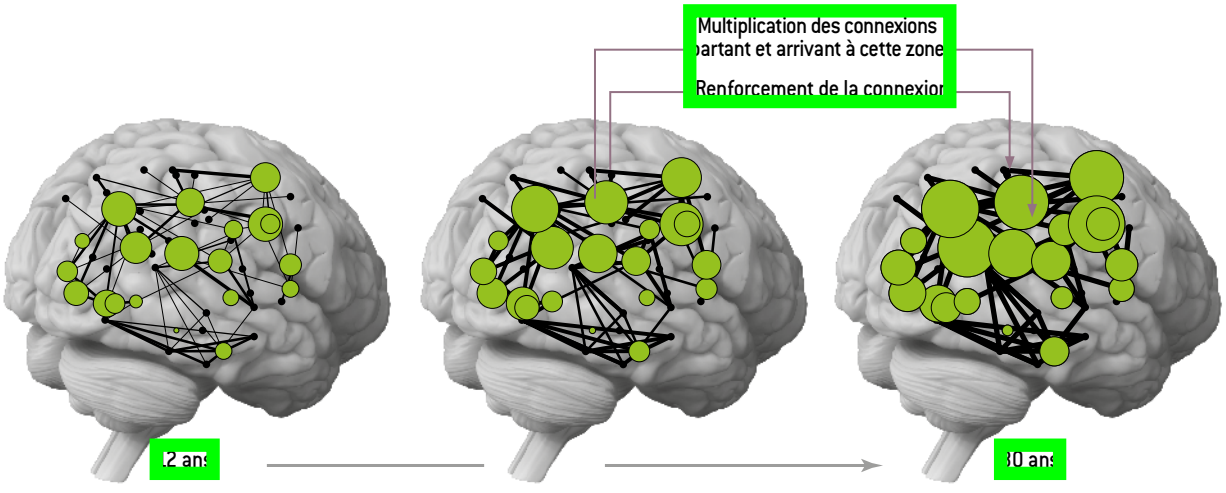
Les techniques d'imagerie ont ouvert une fenêtre sur notre encéphale, mais certaines, telles la tomographie aux rayons X ou la tomographie par émission de positrons, émettent des rayonnements ionisants, ce qui limite leur utilisation chez les jeunes pour des raisons éthiques. En revanche, l'imagerie par résonance magnétique (IRM) est un outil sûr et précis pour analyser l'anatomie et la physiologie du cerveau, quel que soit l'âge. Cet outil a fait émerger une idée dominante : le cerveau des adolescents ne parvient pas à maturation en grossissant, mais en augmentant ses connexions internes et en se spécialisant dans la réponse aux défis extérieurs – par exemple la vie en société.

Sur les images d'IRM, l'augmentation de la connectivité entre les régions cérébrales se traduit par des quantités

LA MATURITÉ VIENT EN DÉVELOPPANT SES RÉSEAUX

La modification la plus importante qui se produit dans le cerveau d'un adolescent n'est pas la croissance des aires cérébrales, mais l'intensification des communications entre les groupes de neurones. Les chercheurs ont analysé cette évolution en appliquant la théorie des graphes aux données de l'imagerie par résonance magnétique (IRM). Ils ont montré qu'entre 12 et 30 ans

les connexions se renforcent entre diverses régions du cerveau ou assemblées de neurones *(lignes noires s'épaississant)*. En outre, certaines zones deviennent davantage connectées *(cercles verts s'agrandissant)*. Ces modifications aident le cerveau à se spécialiser dans les tâches auxquelles il est confronté, depuis la réflexion abstraite jusqu'à la vie en société.



AUGMENTATION DES COMMUNICATIONS ENTRE LES RÉGIONS CÉRÉBRALES AU FIL DU TEMPS

plus importantes de « matière blanche ». Celle-ci est formée de faisceaux d'axones, les longs prolongements des neurones qui conduisent les signaux sortants. L'adjectif « blanche » vient d'une substance grasse appelée myéline, qui entoure et isole les axones. La myélinisation (la formation de cette gaine de graisse) se produit de l'enfance jusqu'à l'âge adulte et accélère notablement la conduction des influx nerveux entre les neurones. Quand les axones sont enveloppés de myéline, ils transmettent des signaux jusqu'à 100 fois plus vite.

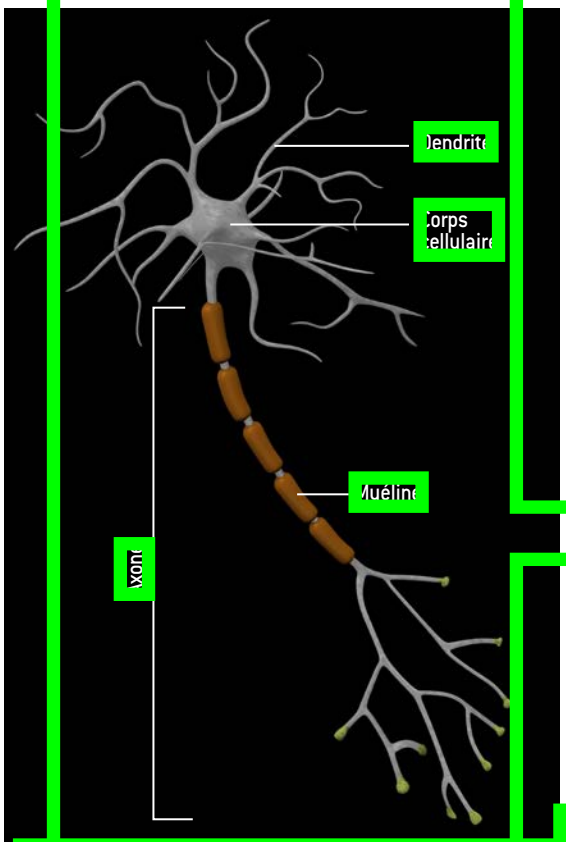
La myélinisation accélère le traitement des informations par le cerveau d'une seconde façon : elle aide les axones à récupérer rapidement après la transmission d'un message, de sorte qu'ils sont prêts plus tôt à relayer les suivants. Cette plus courte durée de récupération multiplie par 30 la fréquence à laquelle un neurone transmet des informations. L'accélération combinée de la transmission et de la récupération augmente d'un facteur 3 000 la puissance du cerveau entre l'enfance et l'âge adulte et autorise la création de vastes réseaux entre les différentes régions cérébrales.

Des études récentes ont révélé un autre rôle, plus subtil, de la myéline. Les neurones reçoivent de multiples influx des autres cellules nerveuses, mais ils ne s'allument pour transmettre eux-mêmes un message que si la somme de ces influx est supérieure à un certain seuil. Or les influx entrants ne s'additionnent que s'ils parviennent au neurone dans un intervalle de temps rapproché. Pour que des influx en provenance de neurones proches et éloignés arrivent presque simultanément, la vitesse de transmission doit donc être parfaitement réglée dans chaque axone et les chercheurs ont découvert que la myéline intervient activement dans cet ajustement fin.

L'activation d'un neurone déclenche une série de modifications moléculaires, qui renforcent ses connexions (ou synapses) avec les neurones recevant l'influx émis. Ce renforcement des connexions forme la base de l'apprentissage. Le rôle de la myéline est donc essentiel pour de multiples raisons. Grâce à son développement rapide, les différentes parties du cerveau interagissent et se coordonnent de plus en plus lorsque des enfants deviennent adolescents, et ce dans une grande variété de tâches cognitives.

Les neuroscientifiques savent maintenant mesurer cette connectivité changeante grâce à la théorie des graphes, une branche des mathématiques où l'on quantifie les relations entre les « nœuds » et les « arêtes » d'un réseau. Un nœud peut être n'importe quelle entité détectable : un neurone, une structure cérébrale (telle que l'hippocampe), une région plus grande (par exemple le cortex préfrontal)… Une arête est une connexion entre des nœuds. Il peut s'agir d'un lien physique, telle qu'une synapse entre deux neurones, ou d'une corrélation statistique, par exemple lorsque deux parties du cerveau s'activent de façon similaire au cours d'une tâche cognitive.

La théorie des graphes nous a aidés à déterminer comment différentes régions cérébrales se développent et s'interconnectent, puis à établir le lien avec les modifications du comportement et de la cognition. Une telle évolution n'a pas lieu qu'à l'adolescence : nombre des circuits cérébraux se développent dans l'utérus et continuent à se transformer pendant toute la vie. Toutefois, chez l'adolescent, la connectivité augmente de façon spectaculaire entre les régions cérébrales intervenant dans le jugement, la sociabilité et la planification à long terme – des capacités qui auront une influence profonde sur le reste de sa vie.



UNE GAINE DE MYELINE *(en marron)* recouvre en partie les axones (les prolongements des neurones qui transmettent les messages sortants, tandis que les dendrites reçoivent les messages entrants). Cette gaine accélère les influx nerveux et décuple la puissance cérébrale.

Pendant que les axones des adolescents se gainent de myéline, une autre modification a lieu. Comme le David de Michel-Ange émergeant d'un bloc de marbre, le cerveau adulte résulte d'un processus de sculpture, au cours duquel les connexions non utilisées ou mal adaptées sont supprimées. Celles qui servent souvent, en revanche, sont renforcées. Le cerveau acquiert ainsi de nouvelles capacités cognitives, grâce auxquelles il s'adapte aux exigences de son environnement.

Un vaste élagage cérébral

À l'adolescence, la balance penche du côté de l'élimination. Lorsque des connexions inutilisées disparaissent, la quantité de matière grise diminue. Cette dernière est principalement constituée de structures non myélinisées, telles que les corps cellulaires des neurones, les dendrites (des projections en forme d'antennes, qui partent des corps cellulaires et reçoivent des informations d'autres neurones) et certains axones. Globalement, la quantité de matière grise augmente pendant l'enfance, atteint un maximum vers l'âge de 10 ans puis baisse durant l'adolescence. Elle se stabilise à l'âge adulte, puis diminue à nouveau lors de la sénescence. À la surface des neurones, une évolution similaire se produit pour la densité de récepteurs activés par des neurotransmetteurs (des composés tels que la dopamine, la sérotonine et le glutamate, qui modulent la communication entre les cellules cérébrales).

Bien que la quantité globale de matière grise culmine aux alentours de la puberté, les

LE GOUT DU RISQUE ET DE LA NOUVEAUTE est manifeste à l'adolescence. Présent chez tous les mammifères sociaux, il aurait été sélectionné par l'évolution pour encourager les adolescents à quitter la sécurité de leur famille, favorisant ainsi le brassage génétique.

Deux à trois fois plus de **décès** et de maladies graves surviennent à l'adolescence, par rapport à l'enfance.

différentes aires cérébrales se développent à des rythmes variés. La quantité de matière grise atteint son niveau maximal d'abord dans les aires dites sensorimotrices primaires, qui assurent la perception et les réponses aux cinq sens : la vue, l'ouïe, l'odorat, le goût et le toucher. Elle plafonne en dernier dans le cortex préfrontal, essentiel pour les « fonctions exécutives ». Cette expression englobe des capacités très diverses, telles que la prise de décision, la planification ou la régulation des émotions.

Une autre fonction importante du cortex préfrontal est la prévision des conséquences potentielles des actes que nous envisageons, grâce à une projection mentale dans le temps. Nous procédons ainsi à des simulations plutôt que de nous soumettre à une réalité potentiellement dangereuse. Comme l'a exprimé le philosophe Karl Popper, au lieu de nous mettre en danger, « nos théories meurent à notre place ».

Au fil de la maturation cognitive, nos fonctions exécutives nous poussent aussi à préférer des récompenses importantes et différées à des gains immédiats, mais plus faibles. Le cortex préfrontal est également essentiel pour la cognition sociale, c'est-à-dire la capacité à gérer des relations complexes, à distinguer les amis des ennemis, à trouver une protection au sein de groupes et à s'engager dans la principale quête de l'adolescence : séduire un ou une partenaire.

L'adolescence est donc marquée par des modifications de la matière grise et de la matière blanche, qui transforment les réseaux cérébraux. Les fonctions du cortex préfrontal ne sont pas absentes pendant cette période ; elles n'ont juste pas encore atteint leur efficacité maximale. Comme elles ne seront pas pleinement matures avant l'âge de 20 ans, les adolescents peinent parfois à contrôler leurs impulsions ou à évaluer les risques et les récompenses.

Les émotions en avance sur la raison

Contrairement au cortex préfrontal, le système limbique atteint vite un stade de développement avancé après la puberté, qui commence en général entre 10 et 12 ans. Ce système engendre les émotions et les sentiments de récompense. Il collabore également avec le cortex préfrontal pour favoriser la recherche de nouveauté, la prise de risques et l'intérêt pour ses semblables pendant l'adolescence.

Ces comportements, profondément enracinés dans la biologie, existent chez tous les mammifères sociaux. Ils encouragent les adolescents à quitter le confort et la sécurité de leur famille pour explorer de nouveaux environnements et nouer des relations extérieures. Ainsi, ils diminuent la probabilité de consanguinité, ce qui crée une population génétiquement plus saine. Mais ils peuvent aussi se révéler dangereux, en particulier lorsqu'ils se concrétisent par certaines pratiques modernes, telles que la consommation de drogues ou la conduite de bolides. Le système limbique exerçant un fort pouvoir d'incitation alors que le contrôle préfrontal n'est pas encore aussi performant qu'à l'âge adulte, l'émotion risque de primer sur la rationalité pendant la décennie que dure l'adolescence.

Quand cette période se termine-t-elle ? Définie comme la transition entre l'enfance et l'âge adulte, elle a un début biologiquement marqué – la puberté –, mais une fin plus floue, déterminée par une construction sociale. Ainsi, on caractérise souvent l'âge adulte par des événements tels que le mariage, l'arrivée d'un enfant

ou l'acquisition d'une maison. Depuis les années 1970, cet âge tend à augmenter dans les sociétés occidentales.

Le fait que la notion d'adulte soit en grande partie une construction sociale a conduit certains psychologues à considérer l'adolescence comme une réalité culturelle plutôt que biologique ; elle serait le fruit d'une évolution dans la manière d'élever les enfants, qu'on ne traite plus comme des adultes dès qu'ils sortent de leurs jeunes années. Cependant, des études sur des jumeaux élevés dans des familles différentes réfutent l'idée que les facteurs sociaux prévalent. Elles montrent que l'environnement peut, dans une certaine mesure, influer sur le rythme de la maturation du cerveau, mais que la planification fondamentale est sous contrôle biologique. Les sociologues le constatent également : la prise de risques, la recherche de sensations fortes et la tendance à se rapprocher de ses semblables s'observent dans toutes les cultures, quoique à des degrés variables.

Quoi qu'il en soit, l'ampleur des modifications révélées par l'IRM dans le cerveau adolescent est frappante. En général, la plasticité diminue à l'âge adulte, tout en restant à un niveau élevé bien plus longtemps que chez les autres animaux.

Vulnérables, mais très adaptables

Notre plasticité cérébrale prolongée nous donne une capacité d'adaptation inégalée, aussi bien en tant qu'individus qu'en tant qu'espèce. Nous prospérons partout, des glaces du pôle Nord aux îles chaudes équatoriales. Grâce à notre puissance technologique, nous arrivons même à vivre dans des vaisseaux en orbite. Il y a 10 000 ans (un battement de cil à l'échelle de l'évolution), notre principale occupation consistait à trouver de la nourriture et des abris. Aujourd'hui, nous sommes nombreux à passer la majeure partie de la journée à manipuler des mots et des symboles, ce qui est d'autant plus remarquable que la lecture remonte à seulement 5 000 ans.

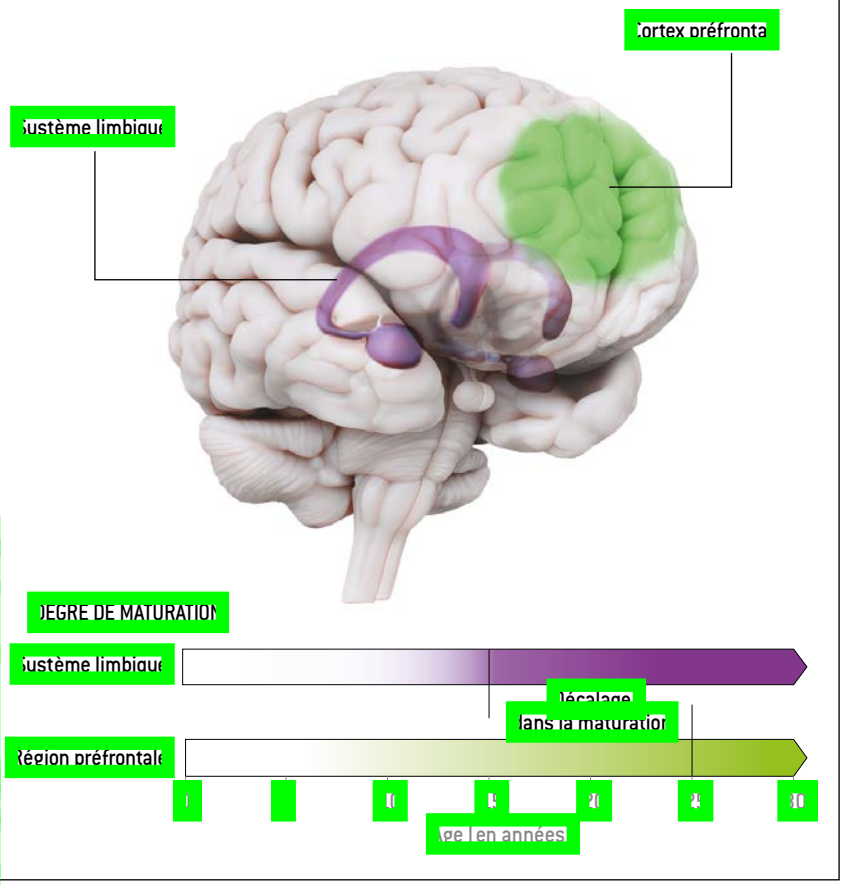
Si cette plasticité prolongée a servi notre espèce, elle crée aussi des vulnérabilités. Plusieurs maladies mentales se développent préférentiellement à l'adolescence : les troubles anxieux, le trouble bipolaire, la dépression, les troubles de l'alimentation, les psychoses... Il est difficile de lier précisément les modifications du cerveau adolescent aux psychopathologies, mais l'idée générale est que les parties du cerveau qui se transforment risquent de dysfonctionner. En d'autres termes, les changements importants survenant au niveau de la matière blanche, de la matière grise et des interconnexions rendent plus probable l'apparition de problèmes. Presque toutes les anomalies découvertes dans le cerveau des adultes schizophrènes ressemblent ainsi à des modifications cérébrales typiques de l'adolescence, mais qui seraient allées trop loin.

À de nombreux autres égards, l'adolescence est la période de la vie la plus saine. Le système immunitaire, la résistance au cancer, la tolérance à la chaleur et au froid sont à leur niveau maximal. Malgré cette robustesse physique, les maladies graves et les décès sont deux à trois fois plus fréquents que pendant l'enfance. Les accidents de véhicules à moteur provoquent environ la moitié des décès des adolescents, dont ils sont la principale cause. Les suicides arrivent ensuite (précédés par les homicides aux États-Unis). Les grossesses non désirées, les maladies sexuellement transmissibles et les incarcérations sont également fréquentes à l'adolescence, risquant de poser des difficultés pour la vie entière.

Comment éviter ces pièges ? Pour les psychiatres, le manque de nouveaux médicaments et la capacité d'adaptation du cerveau adolescent suggèrent que les interventions non médicamenteuses seraient les plus fructueuses. Et ce particulièrement au début de l'adolescence, lorsque le cerveau est en mutation rapide.

LES RACINES DE LA PRISE DE RISQUES

Le goût du risque des adolescents prend racine dans le décalage temporel entre le développement de deux régions cérébrales majeures. Au début de la puberté (généralement entre 10 et 12 ans), diverses hormones accélèrent la maturation du système limbique *(en violet)*, source des émotions. En revanche, le cortex préfrontal *(en vert)*, qui freine les actions impulsives, n'atteint son plein développement qu'une décennie plus tard. Dans l'intervalle, un déséquilibre subsiste.



L'AVENEMENT DE L'ERE NUMERIQUE est l'une des modifications environnementales les plus importantes de l'histoire humaine. La plasticité cérébrale des adolescents leur offre une opportunité unique de s'y adapter.

spécialistes, mais cela commence à changer avec les résultats acquis ces dernières années. La volonté est forte de minimiser les risques pour les adolescents et d'exploiter l'incroyable plasticité de leur cerveau.

Comment se traduira leur capacité d'adaptation face à l'une des modifications environnementales les plus importantes de l'histoire, à savoir la révolution numérique ? Lors des 20 dernières années, les ordinateurs, les jeux vidéo et les téléphones portables ont changé en profondeur la façon dont les adolescents apprennent, jouent et interagissent. Les informations sont aujourd'hui disponibles en masse, mais leur qualité est très variable. À l'avenir, la difficulté ne consistera pas à se souvenir des données, mais à savoir en évaluer une grande quantité de façon critique, y discerner celles que l'on cherche, en faire la synthèse et les utiliser pour résoudre des problèmes réels. Les éducateurs devraient confronter les adolescents à ces tâches, pour entraîner leur cerveau si plastique à répondre aux exigences de l'ère numérique.

La croisée des chemins

Plus généralement, la société pourrait exploiter davantage la passion et la créativité inhérentes à cette période de la vie. Elle devrait aussi se rendre compte que les années de l'adolescence sont un tournant, où l'on peut choisir le chemin de la citoyenneté pacifique, de la criminalité ou, dans de rares cas, de la radicalisation. Dans toutes les cultures, les adolescents sont les plus susceptibles d'être recrutés comme soldats ou comme terroristes, tout comme ils sont le plus facilement orientables vers les professions d'enseignant ou d'ingénieur. Une meilleure compréhension du cerveau adolescent pourrait également aider les juges et les jurés à prendre des décisions dans les procès criminels.

Concernant les adolescents eux-mêmes, les nouvelles connaissances en neurosciences devraient les encourager à solliciter leur plasticité cérébrale pour s'améliorer dans les domaines qui les intéressent. Ils ont une merveilleuse occasion de façonner leur propre identité et d'optimiser leur cerveau en fonction de leurs choix. Ils pourront ainsi naviguer au mieux dans un avenir numérique qui sera prodigieusement différent de ce qu'auront vécu leurs parents.

Certaines interventions dites comportementales sont ainsi très efficaces contre les troubles obsessionnels compulsifs (TOC), qui, sinon, risquent de handicaper à vie le sujet. Elles consistent à déclencher le comportement obsessionnel, par exemple en exposant à la saleté quelqu'un qui se lave les mains toutes les cinq minutes, mais en modifiant peu à peu la réaction - ici en forçant le sujet à se savonner un peu moins. Comprendre que le cerveau est modifiable durant toute l'adolescence apporte l'espoir de redresser le cap en cas de problème. Arrêtons de croire que les jeunes sont des causes perdues !

En dehors des pathologies, il est aussi utile de ne pas oublier la plasticité du cerveau adolescent dans la vie quotidienne. Savoir que les fonctions exécutives préfrontales sont encore en construction, par exemple, peut aider les parents à ne pas réagir avec excès lorsque leur fille se peint subitement les cheveux en orange. L'espoir que son jugement évolue est fondé scientifiquement ! En outre, grâce à cette plasticité, un dialogue constructif avec les adolescents sur des sujets tels que les libertés et les responsabilités est susceptible d'influer sur leur développement.

Les recherches sur l'adolescence restent à approfondir. Elles manquent encore d'infrastructures, de financements et de

BIBLIOGRAPHIE

L. Steinberg, **Age of Opportunity : Lessons from the New Science of Adolescence,** Houghton Mifflin Harcourt, 2014.

Qui sont les ados ?, *L'Essentiel Cerveau&Psycho*, n° 15, août-octobre 2013.

E. L. Dennis *et al.*, **Development of brain structural connectivity between ages 12 and 30 : A 4-tesla diffusion imaging study in 439 adolescents and adults,** *NeuroImage*, vol. 64, pp. 671-684, 2013.

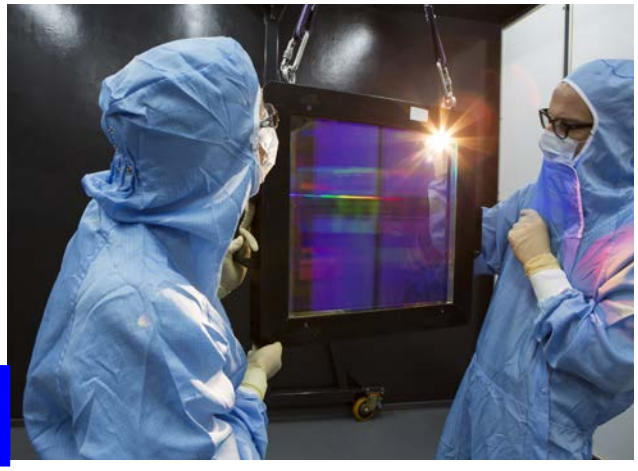
B. Strauch, **The Primal Teen : What the New Discoveries about the Teenage Brain Tell Us about Our Kids,** Doubleday, 2003.

CEA

70 ans de recherche et d'innovation

Dossier réalisé en partenariat avec le CEA

Edition : Olivier Néron de Surgy - Graphisme : Ghislaine Salmon-Legagneu



À l'occasion de son 70e anniversaire, le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives présente, dans ce cahier spécial de *Pour la Science*, quelques-uns de ses grands chantiers de recherche et d'innovation technologique. Climatologie, imagerie médicale, lasers, nanotechnologies, réacteurs nucléaires… ces travaux sont à l'avant-garde de la science d'aujourd'hui.

sommaire

52 **Une climatologie plurielle**
Valérie Masson-Delmotte

56 **Les NEMS en marche**
Eric Ollier

60 **Les systèmes nucléaires du futur**
Christophe Behar

65 **Des lasers ultrabrefs**
Philippe Martin

66 **Mégajoule, laser de l'extrême**
Pierre Vivini et Charles Lion

70 **Mieux voir le corps**
Régine Trebossen et Patrick Pinhon

© Pour la Science - n° 456 - Octobre 2015

Une climatologie plurielle

Valérie Masson-Delmotte

Les recherches menées depuis 70 ans au CEA contribuent à mieux connaître le climat. Elles sont engagées dans des approches innovantes qui aideront à mieux anticiper les variations climatiques en appui aux politiques climatiques.

L'ANALYSE CHIMIQUE d'un échantillon d'air préparée au LSCE à Saclay.

L'état des connaissances qui portent sur le changement climatique fait l'objet, depuis 1990, de rapports du Giec, le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat. Leurs auteurs s'appuient sur les résultats de travaux de recherche pour effectuer tous les cinq ou six ans une synthèse critique sur les changements climatiques, leurs causes, leurs impacts et l'espace des solutions.

Les sciences du climat ont apporté des résultats majeurs et explorent de nouvelles voies de recherche. C'est grâce à ses savoir-faire en métrologie (la science de la mesure), en réseaux d'observation et en techniques de simulation que le CEA a pu s'engager tôt dans ce domaine.

Comme ses précurseurs (le Centre des faibles radioactivités, le Laboratoire de géochimie isotopique et le Laboratoire de modélisation du climat et de l'environnement), le Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE), dont le CEA est partie prenante, a apporté des contributions fortes à la compréhension du fonctionnement du climat et a participé à la rédaction des rapports du Giec. Ses résultats sont le fruit de voies de recherche ouvertes au cours des 70 dernières années : l'application de méthodes physiques pointues, la surveillance de l'atmosphère et la modélisation du système climatique, dans le cadre de grands programmes scientifiques internationaux (*World Climate Research Programme, Past Global Changes, Global Carbon Project*, etc.).

Exploiter les archives naturelles

Le climat terrestre est aujourd'hui surveillé de manière intensive par des réseaux météorologiques et océanographiques, par des observations spatiales… Mais les données obtenues ne sont disponibles que depuis un temps court par rapport aux échelles de temps caractéristiques de la plupart des composantes du système climatique *(voir le schéma page ci-contre)* : 20 ans pour la circulation profonde de l'océan Atlantique, 40 pour l'extension de la glace de mer autour de l'Antarctique, 150 pour la température moyenne à la surface de la Terre… Or, connaître les variations climatiques antérieures est essentiel pour

Valérie Masson-Delmotte est directrice de recherche CEA au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE) à Saclay, près de Paris. Laboratoire mixte du CEA, du CNRS et de l'université Versailles-Saint-Quentin, le LSCE fera partie du département « Sciences de la planète et de l'univers » de l'université Paris-Saclay

© Pour la Science - n° 456 - Octobre 2015

savoir si un changement récent relève ou non de la variabilité naturelle du climat.

Une telle histoire donne aussi accès à des « expériences naturelles » sur les réponses du système climatique aux perturbations astronomiques, volcaniques ou tectoniques. Les résultats permettent de décortiquer le fonctionnement de ce système, ses rétroactions, ses points de bascule… et fournissent un banc d'essai pour tester les modèles de climat.

La paléoclimatologie acquiert de nouvelles informations à l'aide de « reconstructions » appuyées sur des enregistrements indirects, c'est-à-dire des empreintes physiques, chimiques ou biologiques (nommées *proxies*) laissées par les variations climatiques dans des milieux naturels tels que les sédiments des océans ou des lacs, les concrétions des grottes, les sols, les anneaux de croissance des arbres, les coraux et les glaciers, et en datant ces enregistrements. Elle recourt à une logistique antarctique ou maritime, avec notamment le navire océanographique *Marion-Dufresne*, et à des forages ou des carottages opérés avec l'appui de l'institut polaire Paul-Emile-Victor. Elle s'appuie aussi sur des plateformes de laboratoire et leurs innovations en matière de datation et d'analyse ultra-précise de milliers d'échantillons. Certaines reconstructions sont ainsi réalisées à partir de la mesure de l'abondance de différents isotopes du carbone ou de l'oxygène, qui dépend des conditions climatiques présentes lors de la formation des dépôts étudiés. Un travail important, mené à l'aide notamment d'approches statistiques et de modélisations, porte sur la quantification des relations entre les paramètres mesurés sur les *proxies* et les variables climatiques.

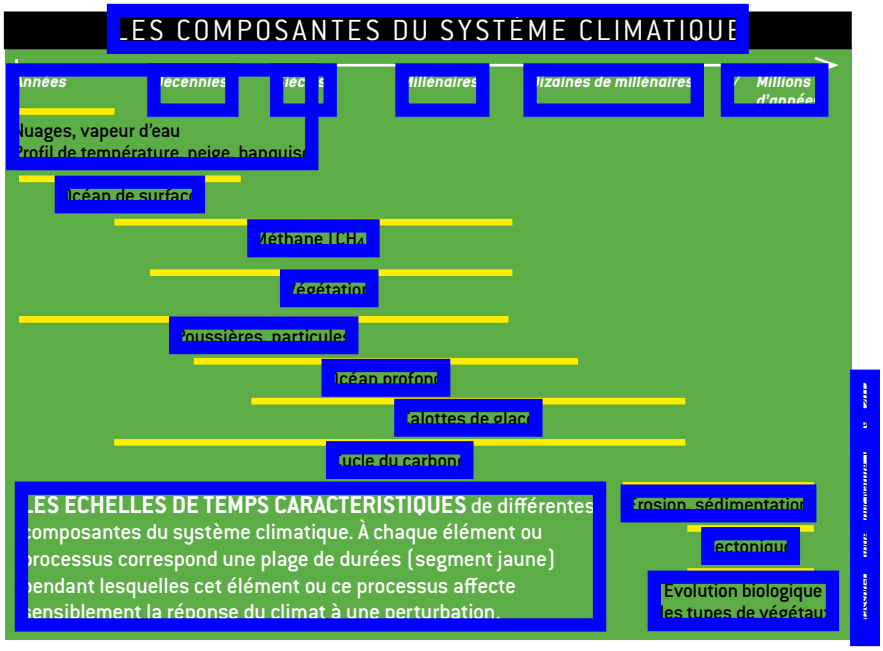
Les recherches menées au CEA sur les archives naturelles ont apporté des clés pour caractériser et comprendre les variations climatiques les plus intenses ou brusques au cours du dernier million d'années, lors des transitions entre les périodes glaciaires et interglaciaires. Elles ont mis en évidence l'importance des interactions entre le climat, la circulation océanique, les calottes de glace (et donc le niveau des mers) et le cycle du carbone, tout particulièrement dans l'océan Austral. Appréhender correctement le rôle de ces interactions dans les variations climatiques passées et futures reste néanmoins un grand défi. Un nouveau projet de forage dans les glaces antarctiques, *Beyond Epica*, vise à comprendre les mécanismes de la dernière grande réorganisation du climat, il y a environ un million d'années, marquée par une augmentation de l'amplitude et de la durée des glaciations par rapport aux périodes antérieures.

Évaluer les modèles

Les informations issues de périodes clés de climats passés jouent un rôle déterminant dans l'évaluation de la confiance qu'on peut accorder aux modèles numériques, seuls outils qui permettent de prédire l'évolution climatique future. Cette évaluation repose en effet sur la confrontation entre ces données et les résultats de simulations qui sont généralement effectuées à partir d'un climat moyen sur plusieurs siècles et « à l'équilibre ».

Les travaux en cours portent sur l'évaluation de la capacité des modèles à rendre compte correctement des aspects transitoires des variations climatiques passées, comme celles du dernier millénaire dues aux variations de l'activité des volcans et du Soleil, ou des instabilités les plus rapides intervenues lors des glaciations.

Le LSCE joue un rôle moteur dans le *Paleoclimate Modelling Intercomparison Project*, un programme de recherche international qui porte sur l'évaluation des modèles de climat par leur confrontation aux données paléoclimatiques. Un autre travail en cours



LA REMONTEE D'UN CAROTTIER à bord du *Marion-Dufresne*, lors d'une campagne océanographique menée dans l'océan Indien en 2011.

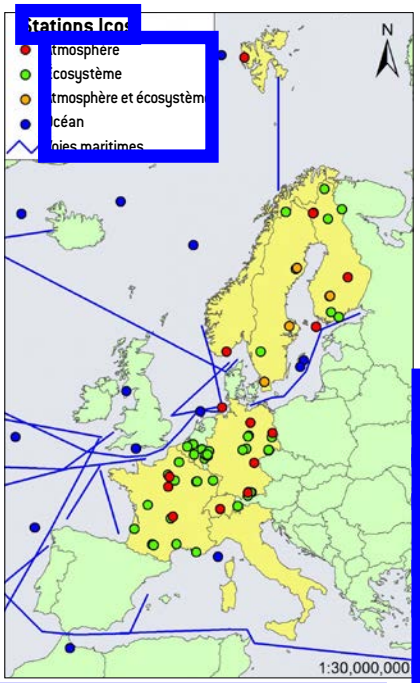
concerne les mesures isotopiques effectuées sur la cellulose de cernes d'arbre pour connaître les variations climatiques au cours des derniers siècles : elles fournissent un banc d'essai pour évaluer les modèles de réponse de la végétation à l'augmentation de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone (CO_2) et au changement climatique.

Les connaissances acquises au CEA sur les climats passés font maintenant partie du socle emblématique des sciences du climat et sont intégrées dans les programmes scolaires de sciences de la vie et de la Terre. Elles fournissent des repères pour situer les risques d'évolution climatique future par rapport aux amplitudes et aux rythmes des changements passés. Elles motivent l'extension de la modélisation du climat à toutes ses composantes (atmosphère et océan mais aussi cycles biogéochimiques, surfaces continentales, hydrologie, glaces…).

Surveiller l'atmosphère

Les développements instrumentaux récents ont consisté notamment à mettre au point des moyens de télédétection de gaz à effet de serre et des outils précis (des spectromètres infrarouges) pour le suivi *in situ* des concentrations d'éléments présents à l'état de traces dans l'atmosphère. Ils ont permis d'analyser précisément la composition de l'atmosphère dans le cadre de campagnes de mesures intensives ou de surveillance à grande échelle et à long terme. Celles-ci servent à évaluer la qualité de l'air, à identifier les émissions de gaz ou de particules et les processus à l'origine de pics de pollution, et à suivre l'évolution de la composition atmosphérique liée aux activités humaines.

Le CEA est ainsi un acteur majeur du suivi des gaz à effet de serre sur le long terme. Il a été l'un des pionniers européens du développement de la métrologie de précision des concentrations atmosphériques du méthane et du CO_2. Au cours des 30 dernières années, des réseaux coordonnés de stations de prélèvement ou de suivi *in situ* de la composition atmosphérique ont été mis en place à l'échelle française et à l'échelle européenne au travers de la très grande infrastructure de recherche Icos. Les données collectées sont combinées aux calculs des modèles de circulation océanique et atmosphérique qui intègrent les cycles biogéochimiques et les processus couplant le climat et le cycle du carbone. L'inventaire des émissions d'origine humaine et la prise en compte des mesures de concentrations atmosphériques sont essentiels pour déterminer la moyenne et la variabilité de la fraction des émissions anthropiques qui est stockée par les puits de carbone constitués par l'océan, les sols et la végétation.



LES STATIONS DE MESURES impliquées dans le programme européen Icos.

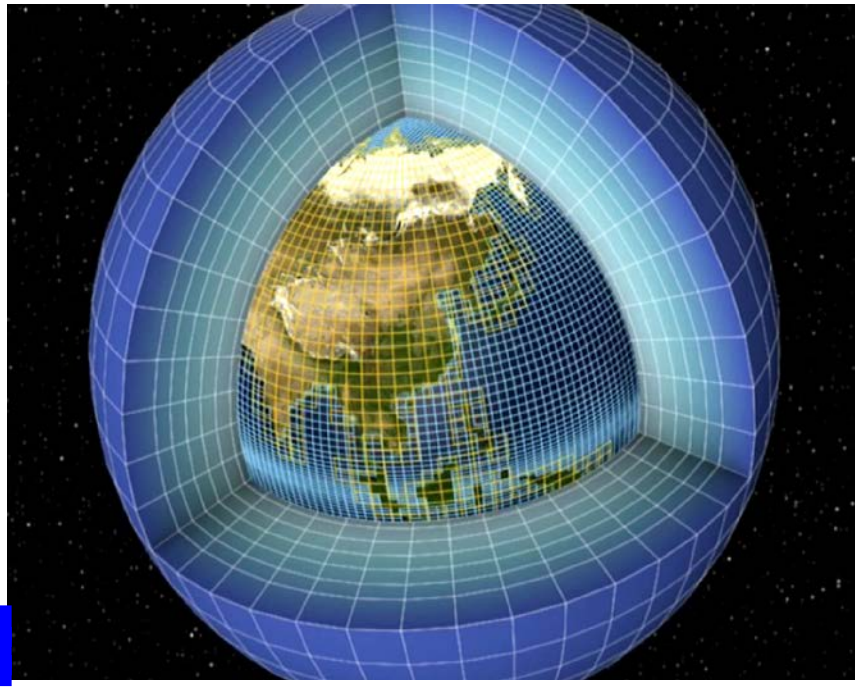
Cette approche requiert des mesures très précises, des campagnes spécifiques pour mieux évaluer les émissions de gaz à effet de serre dans certaines régions (le pergélisol arctique, par exemple) ou certains processus naturels ou anthropiques ; elle repose également sur des méthodes statistiques « d'assimilation de données » ou « d'inversion » grâce auxquelles sont évaluées les marges d'erreur des résultats. Là encore, le LSCE y a contribué en combinant modélisation et savoir-faire métrologique (campagnes de terrain, réseau de mesures). Ses résultats motivent une amélioration de la modélisation des cycles biogéochimiques et des interactions entre climat, cycle du carbone, cycle de l'azote et maintenant celui du phosphore, pour le climat actuel comme pour l'évolution climatique passée et future.

Développer de nouveaux modèles

Dès les années 1980, des travaux pionniers de modélisation des climats passés ont été menés au CEA à l'aide des premières versions du modèle développé par le Laboratoire de météorologie dynamique ; ils sont aujourd'hui poursuivis au sein de la fédération de recherche de l'institut Pierre-Simon-Laplace (IPSL). Dans les années 1990, le développement de la puissance de calcul du CEA a donné un coup d'accélérateur à cette activité.

Le LSCE contribue activement à la construction du modèle « du système Terre » de l'IPSL avec des couplages entre

© Pour la Science - n° 456 - Octobre 2015



UN MAILLAGE de l'atmosphère et de la surface de la Terre utilisé pour les simulations numériques qui reposent sur le modèle de climat de l'institut Pierre-Simon-Laplace. Pour chaque maille est calculée, à partir des équations de ce modèle, l'évolution de différentes grandeurs : température, pression, humidité, nébulosité, précipitations…

es différentes composantes du système climatique, en prenant en compte la chimie tmosphérique, les poussières désertiques, es cycles du carbone et de l'azote… et maintenant en améliorant les couplages avec l'hydrologie continentale, le pergélisol et les calottes polaires. L'intégration de ces « composantes lentes » permet d'évaluer es effets à long terme, potentiellement rréversibles, des perturbations anthropiques ur le système climatique. La dynamique, a chimie et la biologie du changement climatique, ainsi que ses conséquences sur es surfaces continentales et sur l'océan, ont également modélisées.

Cette capacité de modélisation est essentielle non seulement pour comprendre es mécanismes des grands changements climatiques passés mais aussi, grâce à a confrontation entre les observations écentes et l'évolution simulée du climat, our savoir si les changements récents ont exceptionnels et pour identifier leur ause. Le LSCE s'est attaché en particulier étudier des événements météorologiques xtrêmes, tels que les vagues de chaleur, les empêtes ou les fortes précipitations, qui demandent de développer des méthodes tatistiques spécifiques. Ses approches visent évaluer la part d'influence humaine dans es phénomènes, à connaître les mécanismes et à mieux les anticiper à l'aide d'une égionalisation des simulations climatiques. ous ces travaux relient des questions de recherche fondamentale, autour de a modélisation et la compréhension de systèmes complexes, à des enjeux de recherche sociétale, plus appliquée et construite avec des acteurs socioéconomiques. Le LSCE participe ainsi au développement des « services climatiques ». Cet ensemble d'outils et d'expertises vient en appui des stratégies d'atténuation du changement climatique ou d'adaptation à celui-ci. Il permet par exemple d'identifier des vulnérabilités à ce changement et de définir des indicateurs pertinents pour certains secteurs d'activité.

Coupler le fondamental et le sociéta

Que ce soit par l'étude des climats passés, par la surveillance des gaz à effet de serre, par l'évaluation des modèles de climat ou par l'étude des événements extrêmes, le LSCE continue d'alimenter les rapports du Giec et poursuit son action dans la définition et l'avancée des grands programmes de recherche internationaux sur l'évolution passée, présente et future du climat.

Le constat d'une influence humaine sur le climat et ses conséquences graves sont aujourd'hui clairs. Les connaissances scientifiques sont suffisantes pour évaluer les cumuls de rejets de gaz à effet de serre compatibles avec la maîtrise du réchauffement climatique et avec l'objectif, inscrit dans les traités internationaux, de limiter le réchauffement à deux degrés. De nombreuses voies de recherche restent toutefois ouvertes, afin notamment d'anticiper les variations climatiques plus précisément et plus localement.

Les sciences du climat évoluent par la conjonction de recherches fondamentales et d'études sociétales dans le contexte de la transition énergétique et agroforestière qui consiste à réduire les rejets de gaz à effet de serre, et donc à limiter les aspects inacceptables du réchauffement) et de l'adaptation aux changements. Le volet fondamental comporte en particulier des campagnes d'études de processus mal connus et des travaux qui croisent différentes échelles de temps et d'espace ; le volet sociétal s'élargit aux approches qui couplent sciences du climat, sciences du vivant et sciences humaines et sociales, comme l'illustre le vaste périmètre de la conférence tenue à Paris en juillet 2015 et intitulée « Notre futur commun sous le changement climatique ». ■

Les NEMS en marche

Eric Ollier

Des systèmes de dimension nanométrique démultiplient les moyens de mesure rapide et précise au service de l'industrie, notamment dans le domaine de la santé

Accéléromètres pour airbags ou pour stimulateurs cardiaques, microphones, boussoles, capteurs d'humidité ou de pression atmosphérique dans les smartphones… cela fait plus de vingt ans que les microsystèmes électromécaniques (ou MEMS, pour *Micro-Electro-Mechanical Systems*) investissent notre quotidien. Aujourd'hui, ce sont les nanotechnologies qui poursuivent la miniaturisation de tels systèmes, non sans difficultés techniques mais avec un horizon vertigineux d'applications possibles.

Les MEMS, souvent façonnés dans du silicium, comportent une structure mobile et des éléments dits « de transduction », qui transforment l'énergie mécanique en énergie électrique par laquelle on obtient une information de nature physique ou chimique : température, pression, acidité, etc. Développés dès les années 1980, ils sont d'abord apparus sur le marché automobile et dans le secteur péri-informatique.

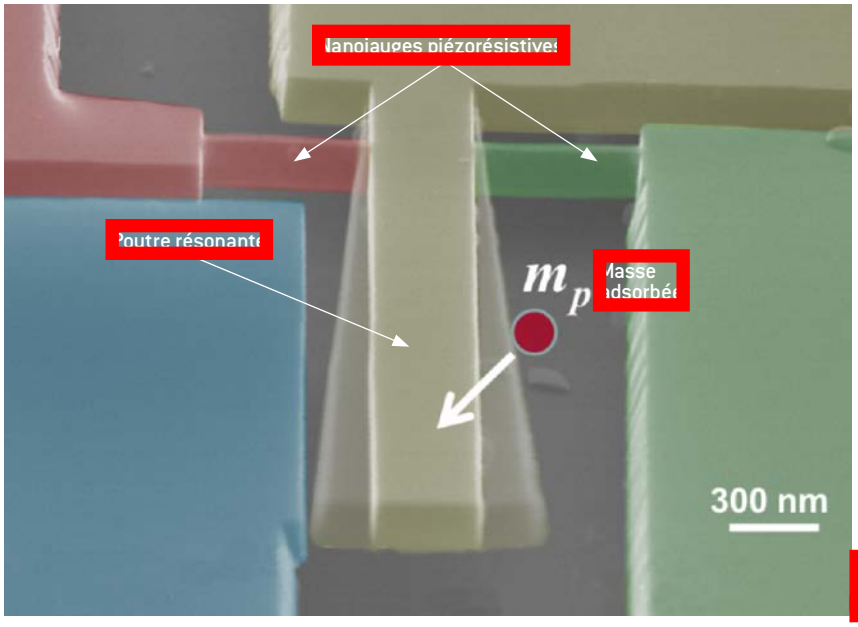
Les recherches fondamentales sur les objets de taille nanométrique (nanotubes, nanofils…) se sont développées en parallèle. On a réussi à manipuler des atomes un par un mais, jusque récemment, il était difficile d'industrialiser l'assemblage de ces nanostructures et de collecter les informations qu'elles produisent. Grâce à la mise en place d'équipes multidisciplinaires, constituées de mécaniciens, d'électroniciens, de chimistes et de biologistes, il est désormais possible de fabriquer et de doter de fonctionnalités très diverses des structures mécaniques aussi petites que l'ADN ou des virus. L'adaptation, à cette échelle, de techniques de miniaturisation propres à la microélectronique permet même aux premières applications industrielles de ces NEMS (*Nano-Electro-Mechanical Systems*) de voir le jour.

Eric Ollier est chef de projet, responsable de la thématique NEMS au sein de l'équipe « Capteurs » du Leti, Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information du CEA, situé à Grenoble, sur le site de Minatec Campus.

Des propriétés singulières

Les NEMS, comme les MEMS, comportent une structure mécanique mobile et des éléments de transduction, mais au moins une de leurs trois dimensions est inférieure à 100 nanomètres (nm) ; cette différence a des conséquences notables.

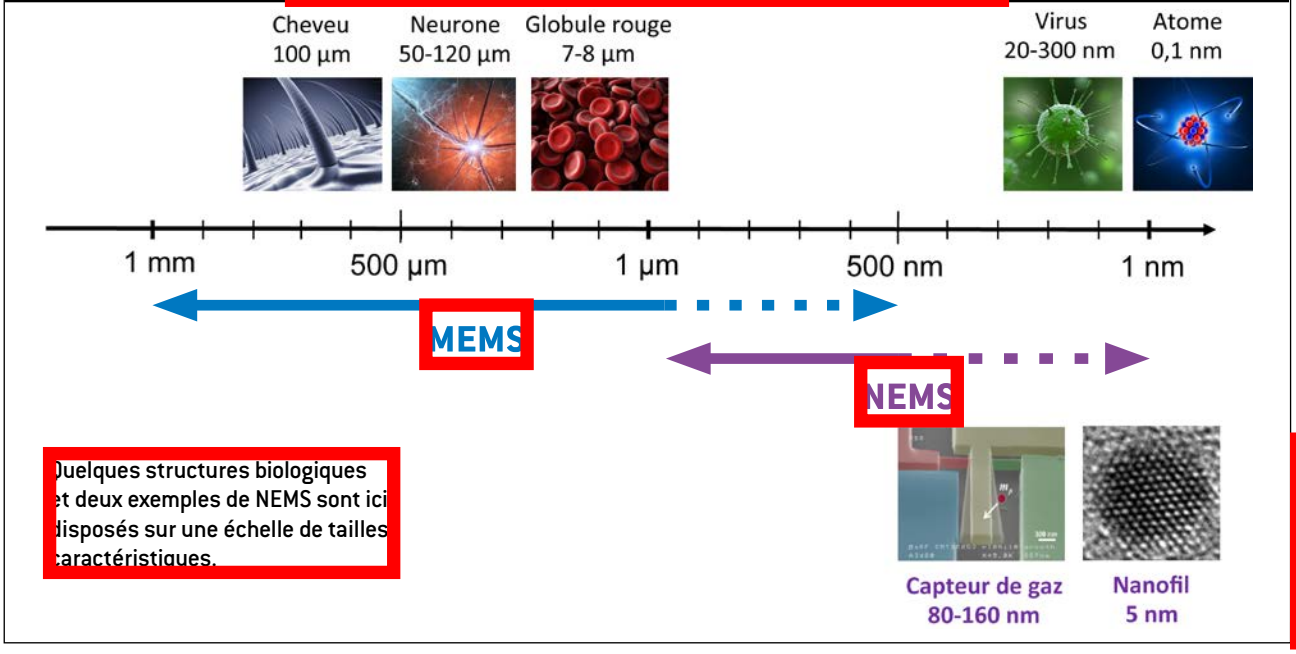
Les chercheurs ont d'abord étudié les propriétés fondamentales de ces objets et les spécificités dues à leur faible dimension, nommées effets d'échelle. Ces effets concernent notamment la conduction électrique. Par exemple, quand la section d'un fil de silicium est réduite à moins de 100 nm, des phénomènes surfaciques deviennent prépondérants : le piégeage de charges électriques en surface réduit la conductivité globale. Au-dessous de 10 nm, on ne peut plus considérer la section du nanofil comme un milieu continu et il apparaît des phénomènes dits « de confinement quantique » qui nécessitent d'adapter les modèles usuels de structure électronique des atomes.



LA STRUCTURE D'UN NEMS ELEMENTAIRE pour la mesure de masse, avec des nanojauges de 80 nanomètres de large et de 160 nm d'épaisseur. L'adsorption de la masse (m_p) sur la nanopoutre modifie sa fréquence de résonance.

© Pour la Science - n° 456 - Octobre 2015

LES ÉCHELLES DE TAILLE DES MEMS ET DES NEMS



Quelques structures biologiques et deux exemples de NEMS sont ici disposés sur une échelle de tailles caractéristiques.

Il semble néanmoins possible de tirer parti de ces phénomènes. C'est le cas avec l'effet piézorésistif (la variation de la résistivité électrique d'un matériau lorsqu'il est soumis à une contrainte mécanique), qui peut être décuplé dans certaines conditions, au point de fournir un gain de signal électrique de plusieurs ordres de grandeur par rapport à un matériau cristallin classique.

De plus, lorsque les surfaces des structures sont séparées de moins de 200 nm, des forces particulières sont susceptibles de se manifester. C'est le cas de la force de Casimir, qui n'est plus négligeable par rapport aux forces électrostatiques et qui peut modifier la limite de stabilité d'un NEMS. Cette force qui s'exerce entre deux plans est la manifestation des effets de « fluctuations quantiques du vide ». Des chercheurs du CEA ont apporté aux modèles de NEMS des évolutions qui en tiennent compte. Il est même envisagé, en contrôlant la nanostructure des surfaces et leur espacement, d'exploiter la force de Casimir pour actionner des nanosystèmes.

Outre une masse très faible (entre 10^{-15} et 10^{-18} gramme), les faibles dimensions des structures des NEMS leur confèrent des fréquences de résonance (comparables aux fréquences propres des cordes de guitare, donc à leurs notes respectives) très élevées, allant jusqu'à plusieurs gigahertz (GHz).

L'ensemble de ces propriétés rend les NEMS extrêmement sensibles à des « stimuli externes » : leurs fréquences de résonance sont modifiées en présence d'une masse aussi petite que 10^{-21} gramme ou d'une force d'intensité aussi faible que 10^{-18} newton. Ils peuvent fonctionner avec une puissance aussi réduite que 10^{-18} watt, ce qui les rend très peu consommateurs d'énergie, donc adaptés à la réalisation de capteurs durablement autonomes.

La communauté des chercheurs les a d'abord utilisés pour explorer la physique du « nanomonde » : quantifier la force de Casimir, observer le comportement de nanorésonateurs de très haute fréquence couplés avec des transistors à un seul électron... En 2012, un nanotube de carbone long de quelques centaines de nanomètres, résonant à 2 GHz, placé dans un vide ultrapoussé et sous une température de 5 kelvins a permis d'évaluer une masse à 10^{-24} gramme près, un seuil symbolique visé depuis une dizaine d'années par de nombreux chercheurs.

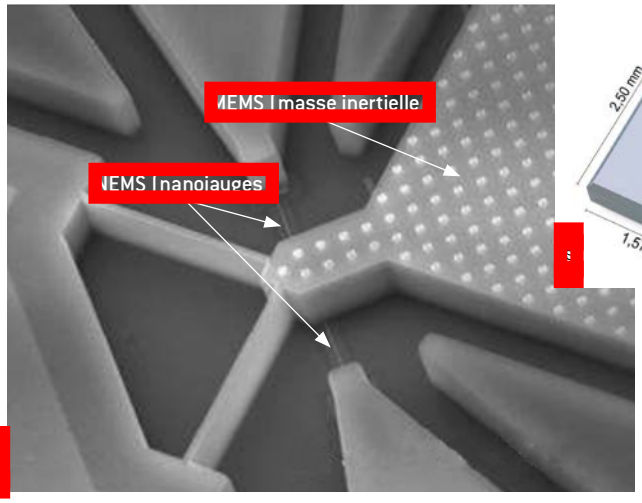
Parmi les applications envisagées, inaccessibles au moyen de MEMS, se profilent des capteurs de gaz ultrasensibles, des nanorelais qui réduisent la consommation électrique de circuits électroniques et des détecteurs de biomarqueurs de pathologies telles que certains cancers. L'autonomie énergétique et la petite taille des NEMS font entrevoir des systèmes de détection largement distribués, reposant sur la dissémination de très nombreux capteurs.

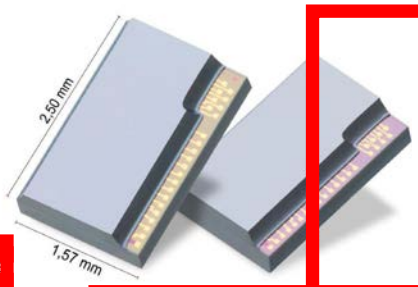
Les NEMS sont aujourd'hui fabriqués dans des salles blanches de laboratoires ou d'usines de microsystèmes ou de microélectronique, selon deux approches principales : la voie *bottom-up*, qui réorganise la matière à partir de ses constituants, jusqu'à manipuler les atomes un par un, ou la voie *top-down*, qui utilise les technologies les plus avancées en matière de réduction des dimensions des composants microélectroniques. Les deux approches sont explorées par le CEA, avec des travaux de haut niveau sur les nanotubes de carbone, par exemple. Néanmoins, pour les développements à visée applicative, c'est la seconde voie qui est privilégiée au Leti, le Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information du CEA.

Des applications industrielles

Les premières réalisations du Leti faites en ce sens datent de 2006. Des MEMS ont été intégrés dans une couche de silicium de 160 nm d'épaisseur pour réaliser des nano-accéléromètres, alors que les couches les plus minces habituellement utilisées comptent plusieurs dizaines de micromètres.

Une difficulté majeure rencontrée dans l'utilisation des NEMS est d'assurer la transmission d'information entre le nanomonde et le macromonde : contrôler précisément le mouvement d'une structure nanométrique ou, inversement, exploiter l'information engendrée par un déplacement de quelques nanomètres. Le recours aux techniques de transduction





UN COMPOSANT M-NEMS
pour système inertiel et deux accéléromètres de la société Tronics. Ce composant comporte une masse de 20 microns d'épaisseur et des nanojauges piézorésistives de 250 nanomètres d'épaisseur et de largeur.

utilisées classiquement pour les MEMS se heurte au fait que la diminution des dimensions augmente l'effet néfaste des capacités parasites provenant notamment des connexions électriques, ce qui induit une perte rédhibitoire de qualité du signal électrique fourni par un NEMS.

Des laboratoires de poche

Les applications des NEMS qui semblent aujourd'hui susciter les plus grandes attentes portent sur la détection d'espèces chimiques dans des mélanges complexes. Elles comptent parmi les plus avancées sur le [illegible] industrielle.

La société Apix exploite déjà la technologie dans des applications en pétrochimie, pour l'analyse de la qualité des gaz dans les réseaux de distribution ou pour la sécurité des personnes sur les sites industriels. Grâce à la capacité des NEMS à mesurer, en temps réel et très précisément, de très faibles concentrations de gaz (des composés organiques volatils, par exemple), leur intégration à des produits nomades, tels que des objets connectés ou des téléphones, multiplierait les moyens de surveillance de la qualité de l'air.
Une surveillance facile à réaliser en tout lieu devrait satisfaire non seulement l'intérêt du porteur d'un tel objet, par exemple pour savoir si son environnement présente des risques pour sa santé, mais aussi le souhait de partager cette information avec une communauté particulière ou avec les pouvoirs publics. On peut espérer des NEMS qu'ils permettent d'étendre aussi largement les moyens d'analyse de l'eau, voire

UN SYSTEME D'ANALYSE DE GAZ
de la société Apix, incorporant les capteurs NEMS du CEA-Leti.

des aliments. La mesure aisée, instantanée et précise de l'alcoolémie est une autre application envisagée ; le diagnostic de certains types de cancers semble également accessible par une analyse de l'haleine. L'étude actuelle de NEMS capables de mesurer des tensions cellulaires ouvre la voie à d'autres applications biomédicales : l'évaluation rapide de l'état de santé d'un tissu organique et le diagnostic précoce de différentes pathologies.

Les recherches de moyens adaptés se sont engagées dans des voies innovantes : la transduction piézorésistive à nanofil de silicium, la transduction piézoélectrique et la transduction magnétique. Le CEA privilégie la première voie ; il a déposé plusieurs brevets en la matière. Sur les aspects fondamentaux comme sur les développements applicatifs, le Leti collabore étroitement avec d'autres équipes, en particulier celle du Kavli Nanoscience Institute (KNI) de Caltech, en Californie.

Une application principalement ciblée par le Leti est la mise au point de NEMS capables de mesurer la concentration de différents gaz présents à l'état de traces (quelques « ppm » ou « ppb », soit quelques millionièmes ou milliardièmes d'un volume) dans des mélanges complexes, comportant typiquement plusieurs dizaines ou centaines d'espèces chimiques. Leur principe de fonctionnement repose sur la mesure des masses de molécules adsorbées à la surface de la nanostructure vibrante, ainsi qu'il a été évoqué précédemment. Le dépôt d'une couche poreuse innovante — et brevetée — sur un tel NEMS dope l'adsorption et améliore ainsi sa sensibilité.

Le succès obtenu dans cette voie constitue une contribution majeure du CEA aux nanotechnologies. *A fortiori*, la technologie élaborée depuis une dizaine d'années en collaboration avec le KNI a donné naissance, début 2012, à la start-up Apix (collaboration qui se poursuit aujourd'hui au sein du Laboratoire commun CEA-Apix), qui a réalisé la toute première application industrielle de NEMS dans le monde. Ce système portatif révolutionne l'analyse par chromatographie gazeuse : il permet de réaliser des analyses sur site et en temps réel. Il intéresse ainsi diverses industries (la pétrochimie, notamment), l'environnement, la sécurité… Sa grande sensibilité offre une solution pour mesurer la qualité de l'air, notamment à l'intérieur des bâtiments, qui est parfois riche de composés organiques volatils néfastes pour la santé.

Les « applications inertielles » (qui exploitent des accélérations ou des rotations), telles que les accéléromètres des systèmes d'airbag ou les gyroscopes de maintien de cap, sont aussi un domaine

© Pour la Science - n° 456 - Octobre 2015

d'utilisations possibles des NEMS. Ces systèmes ne peuvent toutefois fonctionner que s'ils comportent une masse suffisante, supérieure à celle d'un NEMS. Le Leti s'est donc investi dans le développement de « M-NEMS », qui intègrent, sur la même puce de silicium, une partie dont la masse est typique de celle d'un MEMS et un NEMS capable de détecter les mouvements infimes de cette partie massive. Protégée par un portefeuille de brevets, cette approche a déjà fait l'objet d'un transfert de technologie à la société Tronics en 2013.

Des NEMS pour la biologie

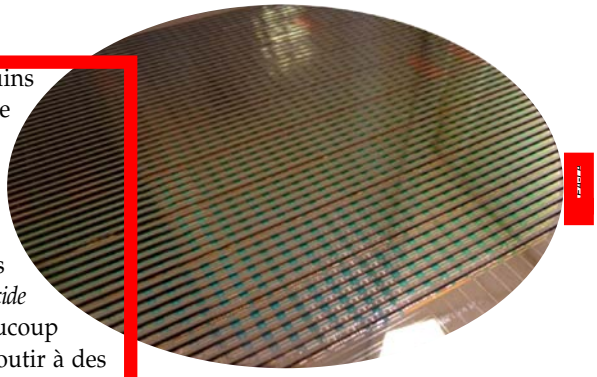
Une autre activité importante en cours de développement au CEA porte sur la spectrométrie de masse (MS). Ses attendus concernent la recherche en biologie et les applications biomédicales. Outre la capacité à compter des molécules biologiques une par une, une MS recourant aux NEMS peut dénombrer des espèces chimiques neutres, une fonctionnalité inaccessible à la MS classique car celle-ci mesure des rapports masse/charge d'espèces ioniques. On entrevoit ainsi la possibilité d'identifier des macromolécules dans un état préservé (aussi parle-t-on de MS *native*), telles que des virus et des anticorps non-ionisés.

Pour y parvenir, il faut conférer aux NEMS une grande capacité de capture de différentes espèces tout en préservant leur grande précision de mesure. La collaboration entre le Leti et le KNI a déjà débouché sur l'identification, par un tel système, d'anticorps sanguins dans un mélange. Une voie prometteuse d'amélioration est le développement de réseaux de centaines de « nanopoutres » couplés à des transistors électroniques CMOS (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*). Il reste beaucoup à faire, cependant, pour aboutir à des composants et des systèmes compatibles avec des applications industrielles.

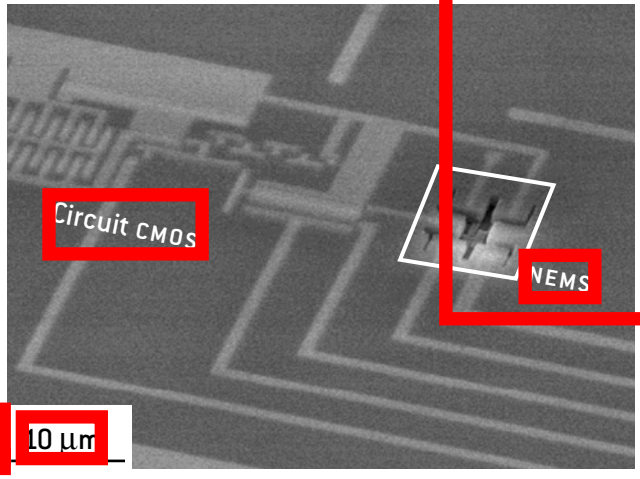
Le Leti et d'autres laboratoires travaillent aujourd'hui sur un couplage NEMS-CMOS qui intègrerait, sur une même puce de silicium, des réseaux de NEMS et une électronique sur couche mince permettant de s'affranchir de signaux parasites et de mettre en œuvre un système à la fois simple, compact et économe en énergie. On envisage ainsi de réaliser des structures constituées de milliers de NEMS contrôlables individuellement. De plus, étant donné que les procédés mis en œuvre sont proches de ceux du CMOS, leur production ne devrait pas nécessairement demander de lourds investissements à l'industrie microélectronique.

Finalement, les NEMS sont passés, en quelques années seulement, du statut d'objet de laboratoire à celui de réalité industrielle, et toutes leurs applications possibles n'ont sans doute pas encore été imaginées. Parmi les défis qui restent à relever, il faut comprendre et dépasser certaines limites rencontrées en pratique, comme celle de la stabilité de la fréquence des nanorésonateurs. Des travaux ont été récemment lancés au CEA en vue d'exploiter la transduction optomécanique, fondée sur le couplage de nanostructures mécaniques et de cristaux photoniques, dont les structures périodiques bloquent certains signaux et en laissent passer d'autres.

Les prochaines orientations technologiques devront évidemment tenir compte de l'utilité potentielle des nouveaux systèmes et de leur coût de production. ■



UNE PLAQUETTE DE SILICIUM de 200 millimètres de diamètre, comportant plusieurs milliers de capteurs de gaz NEMS.



UNE STRUCTURE NEMS-CMOS. Un nanofil de silicium de 30 nanomètres de large est connecté à des transistors CMOS de la filière FDSOI. Cette réalisation du CEA-Leti, en 2012, constitue l'un des couplages NEMS-CMOS les plus avancés à l'heure actuelle.

Les systèmes nucléaires du futur

Christophe Béha

L'industrie nucléaire présente des atouts forts au regard de la demande croissante en énergie et de la nécessaire limitation du réchauffement climatique. Les maintenir sur le long terme passe par la mise au point de systèmes innovants, dits « de quatrième génération », auxquels le CEA consacre de grands efforts.

Certains chiffres parlent d'eux-mêmes : en 2030, la consommation énergétique mondiale devrait augmenter de 50 % par rapport à celle de 2005, sous l'effet conjugué de l'augmentation de la population et de la croissance des pays émergents ; les pays non membres de l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques) devraient totaliser plus de 80 % de cette hausse.

En regard de cette demande, on trouve de nombreuses contraintes, parmi lesquelles la lutte contre le réchauffement climatique, la raréfaction des ressources énergétiques, la sûreté d'approvisionnement, la maîtrise des coûts de l'énergie et la préservation de la balance commerciale.

Quant à la contrainte climatique, le cinquième rapport du Giec, rendu public l'année dernière, est sans appel : d'une part, le réchauffement du climat est sans équivoque et sans précédent (les trois dernières décennies ont été les plus chaudes depuis au moins 1 400 ans) et, d'autre part, l'influence des activités humaines est clairement établie. Limiter la hausse des températures à 2 °C représente donc un objectif majeur (qui sera au cœur de la 21e conférence internationale Climat, aussi nommée Cop21 ou Paris 2015 et organisée en France à la fin de l'année). Cela implique de diminuer le recours aux énergies fossiles et d'augmenter la part d'électricité dans le mix énergétique.

Christophe Béhar est Directeur de l'énergie nucléaire au CEA

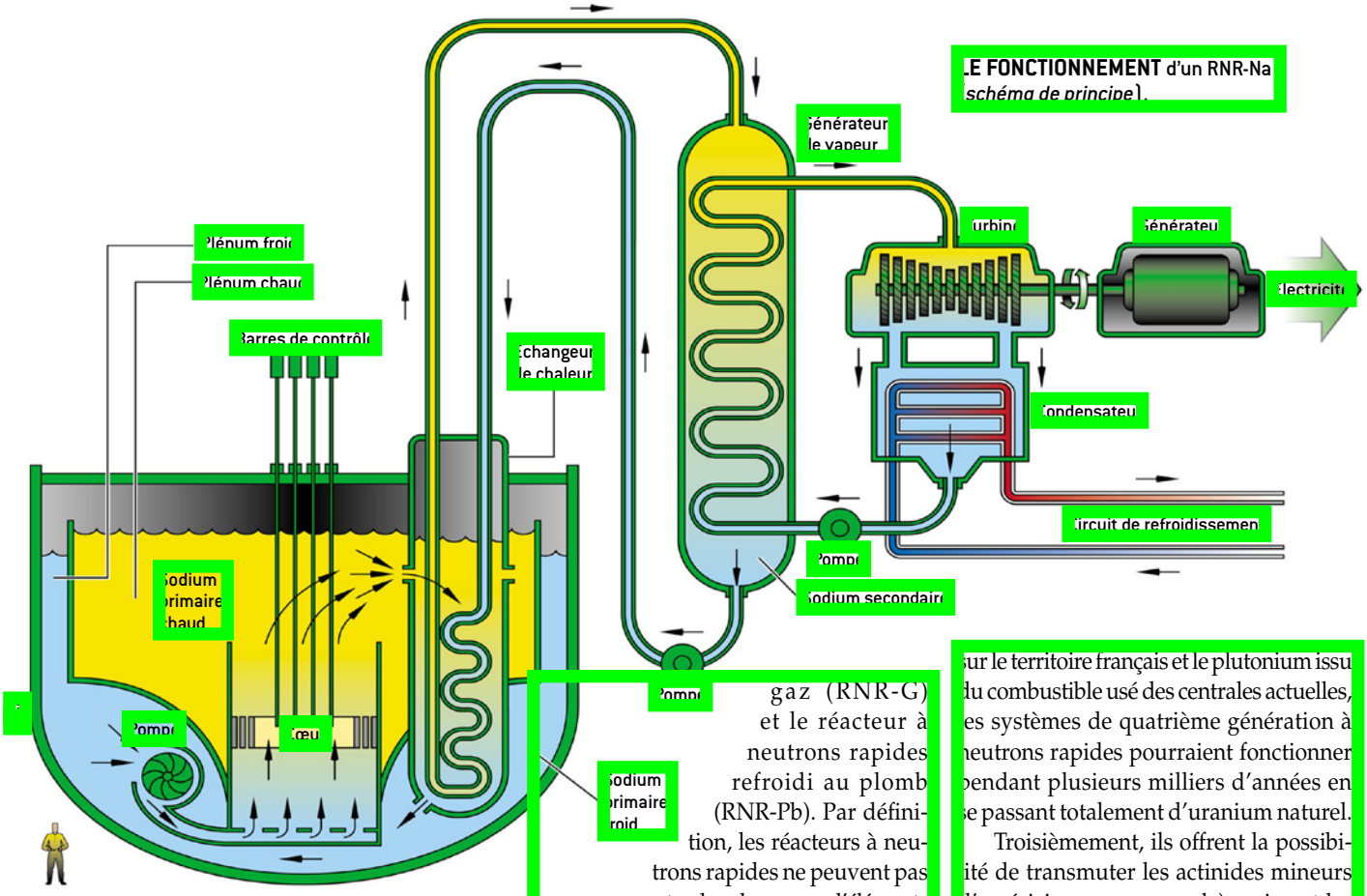
Dans ce contexte, l'énergie nucléaire a un rôle incontournable à jouer en synergie avec les énergies renouvelables puisqu'elles constituent les seuls modes de production d'électricité qui émettent très peu de gaz à effet de serre. Dans le projet de loi française sur la transition énergétique et la croissance verte, elles interviennent en complémentarité : de grandes unités fonctionnant en base pour l'énergie nucléaire ; de petites unités décentralisées et intermittentes pour les énergies renouvelables.

La quatrième génération de réacteurs

Si l'industrie nucléaire dispose d'atouts qui lui permettent de s'imposer comme l'une des solutions prometteuses pour l'avenir, au sein d'un mix énergétique décarboné, elle est aussi confrontée à des enjeux en termes de compétitivité, de disponibilité, de sûreté, de lutte contre la prolifération, de raréfaction de la ressource et de gestion des déchets. Autant de défis qui imposent de poursuivre sur la voie de l'innovation technologique qui a toujours été un moteur du développement de cette industrie. Aujourd'hui, cette innovation passe par le développement de systèmes nucléaires du futur, dits aussi de quatrième génération.

L'évaluation la plus récente et la plus aboutie des technologies capables de répondre aux objectifs définis pour ces

© Pour la Science - n° 456 - Octobre 2015



LE FONCTIONNEMENT d'un RNR-Na (*schéma de principe*).

systèmes a été réalisée dans le cadre du Forum international Génération IV (GIF). Cette association intergouvernementale, lancée en 2000 à l'initiative des États-Unis, regroupe treize membres : l'Afrique du Sud, l'Argentine, le Brésil, le Canada, la Chine, les États-Unis, Euratom, la France, le Japon, la Corée du Sud, le Royaume-Uni, la Russie et la Suisse. Elle élabore et pilote des programmes coordonnés de recherche et développement en support aux systèmes nucléaires, qui doivent satisfaire aux critères de cette quatrième génération de réacteurs : durabilité, économie des ressources en uranium, poursuite des progrès en compétitivité et en sûreté atteints sur les réacteurs à eau de troisième génération, minimisation de la production de déchets radioactifs, plus grande résistance à la prolifération nucléaire, application de l'énergie nucléaire à d'autres voies que la production d'électricité.

Le GIF a sélectionné six concepts de réacteur, dont trois sont intrinsèquement à neutrons rapides : le réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium (RNR-Na), le réacteur à neutrons rapides refroidi au gaz (RNR-G) et le réacteur à neutrons rapides refroidi au plomb (RNR-Pb). Par définition, les réacteurs à neutrons rapides ne peuvent pas comporter dans leur cœur d'éléments modérateurs des neutrons, ce qui est le cas de l'eau, par exemple. Le choix du caloporteur se limite à quelques matériaux présentant une bonne transparence aux neutrons, pour l'essentiel des métaux fondus (sodium ou plomb) ou des gaz (hélium).

L'énergie des neutrons rapides est typiquement plusieurs centaines de fois supérieure à celle des neutrons thermiques des réacteurs du parc actuel. Les systèmes à neutrons rapides (RNR) présentent de ce fait trois intérêts majeurs.

Premièrement, ils peuvent utiliser sans limitation tout le plutonium produit par le parc actuel des réacteurs à eau légère ou par eux-mêmes, ce qui permet d'assurer une gestion rationnelle et pérenne du plutonium, justifiant ainsi pleinement son statut de matière énergétique valorisée.

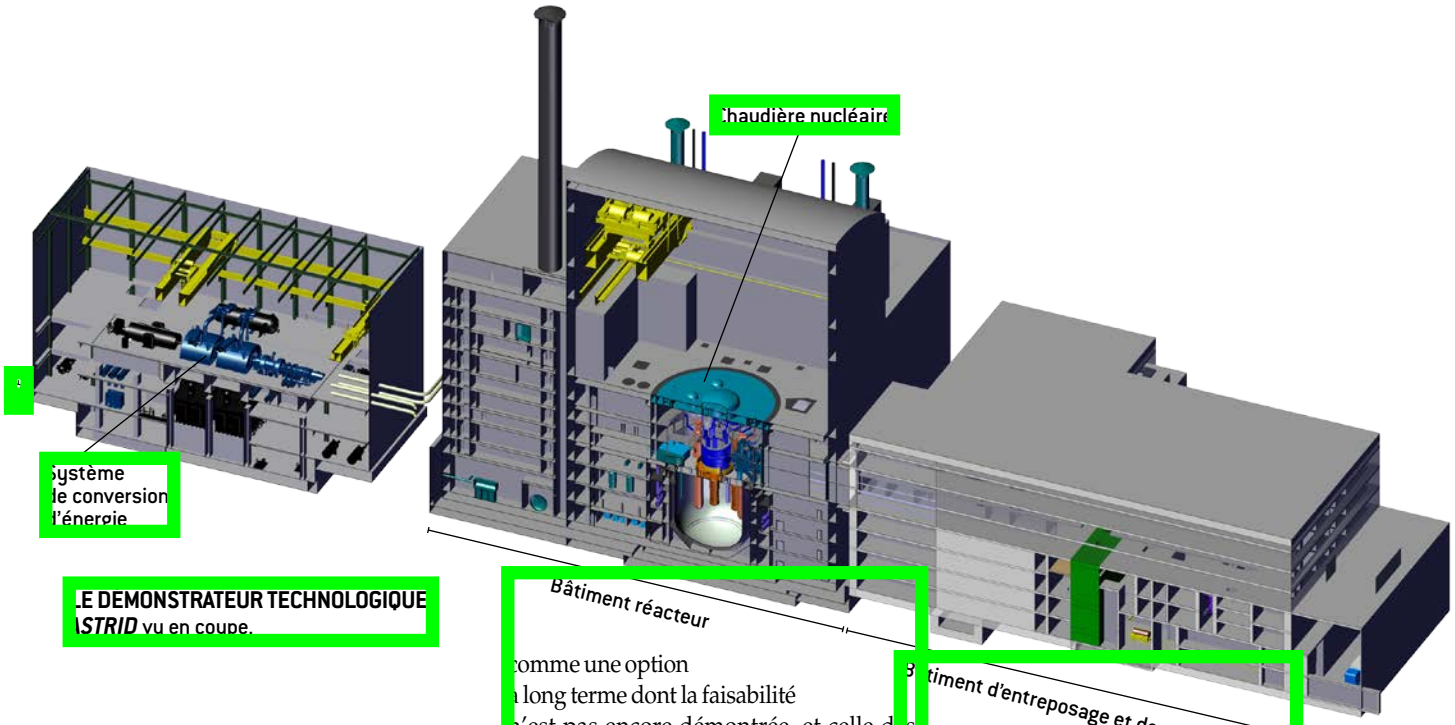
Deuxièmement, ils peuvent brûler tout type d'uranium, alors que dans les systèmes actuels, seul l'uranium 235 (un isotope minoritaire) est utilisé. En permettant de valoriser la totalité de l'uranium extrait du sol, ils multiplient par un facteur proche de 100 l'énergie que l'on peut extraire d'une masse donnée d'uranium naturel. Avec l'uranium appauvri présent sur le territoire français et le plutonium issu du combustible usé des centrales actuelles, les systèmes de quatrième génération à neutrons rapides pourraient fonctionner pendant plusieurs milliers d'années en se passant totalement d'uranium naturel.

Troisièmement, ils offrent la possibilité de transmuter les actinides mineurs (l'américium, par exemple), qui sont les principaux contributeurs de l'émission de chaleur et de la radiotoxicité résiduelle à long terme des déchets ultimes. Il est ainsi possible d'envisager une réduction d'un facteur 10 de l'emprise de la zone de stockage des déchets de haute activité à vie longue, et, au bout de 300 ans, une diminution jusqu'à un facteur 100 de la radiotoxicité contenue dans ces déchets.

Les RNR représentent donc la composante clé d'une stratégie de cycle fermé permettant de gérer efficacement les matières valorisables présentes dans les combustibles usés, d'abord ceux d'un parc de réacteurs à neutrons thermiques, puis ultérieurement ceux d'un parc homogène de réacteurs à neutrons rapides.

Une filière de référence

Au sein du CEA, la Direction de l'énergie nucléaire est chargée de mener pour la France les recherches sur ces systèmes nucléaires en rupture technologique forte par rapport aux précédentes générations de réacteurs du même type. Les recherches se concentrent sur deux filières à neutrons rapides : celle des réacteurs refroidis au gaz, qui apparaît



LE DEMONSTRATEUR TECHNOLOGIQUE *ASTRID* vu en coupe.

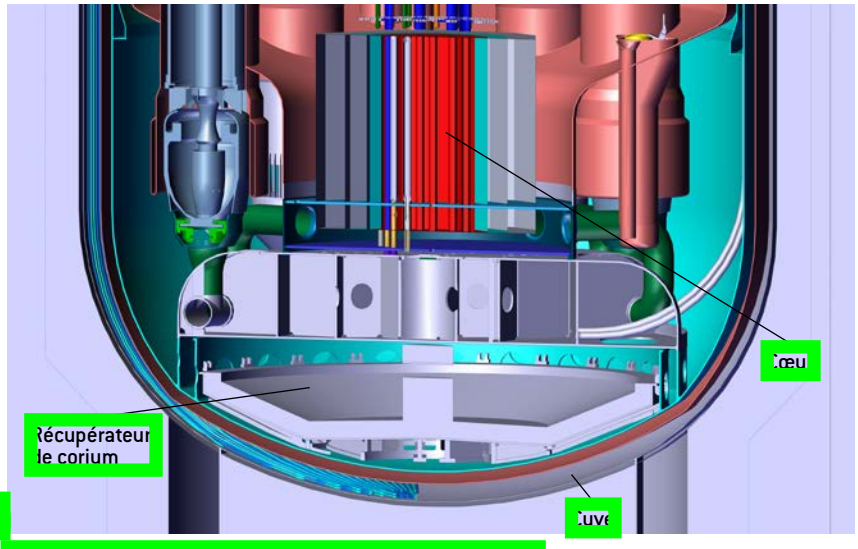
comme une option
à long terme dont la faisabilité
n'est pas encore démontrée, et celle des réacteurs refroidis au sodium, avec le projet de démonstrateur technologique *Astrid* (*Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration*), dont le CEA est maître d'ouvrage pour les études.

Le concept de RNR refroidi au gaz représente une option à long terme, car les verrous technologiques à lever sont importants (à titre d'exemple, il nécessite le développement de matériaux résistants à de très hautes températures et de systèmes d'évacuation de la puissance résiduelle). Son développement s'appuie sur un projet de réacteur expérimental de petite taille, nommé *Allegro*, dont la conception est portée par un consortium européen constitué de quatre instituts de recherche-développement (VUJE Slovaquie, UJV République tchèque, MTA-EK Hongrie, NCBJ Pologne), pour lequel le CEA intervient en soutien. Le premier prototype, non électrogène dans un premier temps, sera nécessairement de très faible puissance, et ne saurait fonctionner avant 2030.

« En France, les études sont pilotées par le CEA autour du projet *Astrid*. »

Le concept de RNR refroidi au sodium est la filière de référence pour les RNR de quatrième génération, avec une dimension internationale potentielle et une maturité qui pourrait être atteinte pour la seconde moitié de ce siècle en France, et probablement plus tôt dans d'autres pays. En France, les études sont pilotées par le CEA, autour du projet *Astrid*, qui bénéficiera de l'expérience des RNR ayant déjà fonctionné dans le monde, mais qui sera en rupture technologique complète avec eux.

Le choix du sodium comme fluide caloporteur découle d'une analyse multicritère. Outre le fait qu'il ne ralentit pas les neutrons – condition essentielle pour les RNR –, le sodium liquide est doté de bonnes propriétés thermiques (conductivité, évacuation de la chaleur) et d'une faible viscosité, ce qui en fait un excellent caloporteur. Il est faiblement activé par les neutrons, ce qui évite de produire de grandes quantités de déchets radioactifs. Il est peu corrosif, ce qui le rend compatible avec les aciers. En outre, il offre d'excellentes garanties en termes de sûreté ; sa faible inertie thermique confère ainsi aux RNR-Na un excellent comportement en cas de perte de source froide externe (atmosphère, eau). Ses principaux inconvénients résident en son opacité (qui complique certaines opérations d'inspection ou de maintenance) et en sa forte réactivité chimique avec l'eau



LE REACTEUR D'*ASTRID*, avec son récupérateur de corium

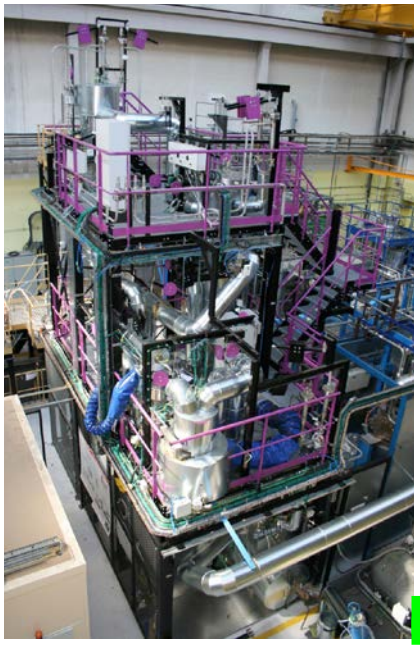
© Pour la Science - n° 456 - Octobre 2015

et l'oxygène de l'air. Ils sont suffisamment bien connus pour permettre de développer des parades efficaces ; ainsi, l'utilisation du sodium ne constitue pas un frein à l'atteinte des objectifs de la quatrième génération. Autre avantage, les RNR-Na ont fait l'objet de nombreux projets dans le monde qui ont permis d'accumuler plus de 400 années·réacteur d'exploitation, dont 100 en exploitation industrielle. Ils constituent, par ailleurs, la voie aujourd'hui retenue en référence par l'ensemble des pays qui se sont engagés dans le développement de RNR de cette nouvelle génération.

Des options innovantes

Le déploiement industriel de RNR-Na de quatrième génération nécessite la qualification préalable, à une échelle représentative, des diverses avancées technologiques appelées par les objectifs de performance assignés à la quatrième génération de réacteurs nucléaires. C'est dans ce contexte que le démonstrateur technologique *Astrid* a été proposé par le CEA et ses partenaires. Sa puissance (1 500 mégawatts thermiques, soit environ 600 mégawatts électriques) a été définie pour concilier une flexibilité d'utilisation suffisante et la nécessaire représentativité au regard des principaux aspects industriels.

La phase de R&D qui se poursuit permet des choix d'options particulièrement avancés, notamment en matière de sûreté et d'exploitabilité. Parmi les avancées décisives réalisées par le CEA et ses partenaires figurent les éléments suivants : un cœur innovant, naturellement résistant aux situations accidentelles, qui confère au réacteur un comportement naturel favorable en cas de perte de refroidissement et qui constitue une avancée essentielle, unique au monde, dans le domaine de la sûreté ; un système de conversion d'énergie qui n'utilise pas d'eau, mais un gaz, supprimant ainsi toute possibilité d'interaction de l'eau et du sodium ; un récupérateur de cœur fondu (le corium) intégré à la cuve du réacteur ; des dispositions d'inertage à l'utilisation d'un gaz inerte comme l'azote pour supprimer les risques de réaction du sodium avec l'air) et de détection précoce de fuites qui éliminent les risques de feu de sodium ; des moyens multiples et redondants d'évacuation de la puissance résiduelle, le réacteur pouvant en outre utiliser l'atmosphère comme moyen de refroidissement, même en cas de perte des alimentations électriques et de la source froide. De plus, la conception de ce système prend en compte les besoins d'inspection en service pendant toute la durée de vie du réacteur. *Astrid* intègre également des dispositions qui permettent de réduire la durée des arrêts pour le rechargement du combustible et d'augmenter le taux de combustion ainsi que la durée de cycles.



MOYENS D'ETUDES et de développement du système de conversion d'énergie d'*Astrid*, qui utilise un échangeur de chaleur sodium-gaz.

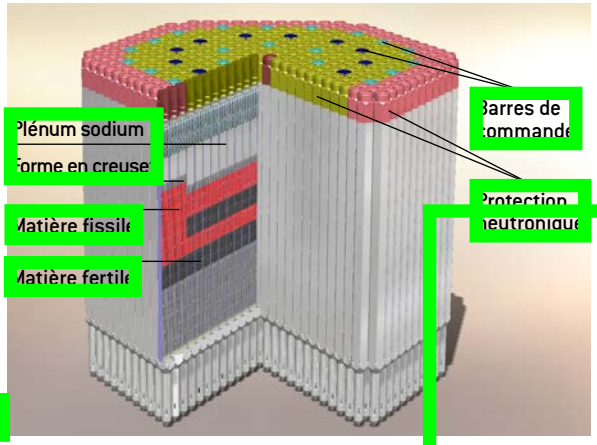
Des collaborations nombreuses

Pour la mise en œuvre du projet *Astrid*, le CEA est entouré d'industriels partenaires qui participent aux études au travers d'accords de collaboration prévoyant une contribution sur leurs fonds propres. Ce projet implique d'ores et déjà 600 personnes, dont près de la moitié sont le personnel de ces partenaires. Tandis que la maîtrise d'ouvrage et le pilotage du projet sont assurés par le CEA, de nombreux industriels, français mais aussi étrangers, y participent : Areva intervient dans le domaine de la chaudière (c'est-à-dire du cœur jusqu'au générateur de vapeur), du contrôle commande et des auxiliaires nucléaires ; EDF est impliqué dans la R&D et l'assistance à la maîtrise d'ouvrage ; Alstom intervient dans le domaine du système de conversion d'énergie ; Bouygues le fait sur le génie civil et la ventilation ; Comex Nucléaire se consacre principalement sur la problématique de l'inspection en service ; Jacobs France travaille sur les moyens communs et les infrastructures ; Toshiba collabore sur

MOYENS D'ESSAIS de systèmes de détection de fuite sur les tuyauteries du circuit de sodium secondaire d'*Astrid*.

Le cœur innovant du réacteur *Astrid*

Breveté en 2010, le cœur « à faible vidange » (CFV) est l'un des principaux éléments qui différencient le réacteur *Astrid* de celle des RNR précédents. L'enjeu, pour les équipes du CEA et de ses partenaires, était de développer un cœur dont la réactivité diminue en cas de fuite de sodium, jusqu'à l'arrêt des réactions nucléaires.



LE CŒUR D'*ASTRID*
à faible effet de réactivité en cas de vidange du sodium (*vue en coupe*).

Le sodium ralentit un peu, réfléchit ou capture les neutrons. Par conséquent, sa disparition ou sa dilatation locale dans le cœur entraîne une variation de la réactivité, qui résulte de deux effets antagonistes : un effet positif, dû au fait que les neutrons sont moins ralentis et moins capturés, et un effet négatif, lié à l'augmentation des fuites de neutrons hors du cœur. Le taux de fuite de neutrons diminuant avec l'augmentation de la taille du cœur, l'effet d'une vidange du sodium sur la réactivité est largement positif pour les grands cœurs de forte puissance de conception traditionnelle, ce qui constitue une problématique de sûreté délicate à gérer pour les RNR-Na. Pour obtenir un effet négatif – voire faible – sur la réactivité, le CEA a développé avec ses partenaires un cœur dont le principe est d'amplifier la composante de fuite, grâce à la combinaison de plusieurs dispositions géométriques : la réduction de la proportion volumique du sodium dans le cœur, obtenue en diminuant le diamètre du fil espaceur situé entre les aiguilles de combustible ; le concept de plénum sodium, qui se matérialise sous la forme d'une cavité remplie de sodium et placée au-dessus du faisceau d'aiguilles, à l'intérieur des assemblages combustibles (ce plénum, en situation vidangée, favorise la fuite des neutrons hors du cœur), et celui d'un cœur à géométrie hétérogène, avec une plaque non fissile placée à environ mi-hauteur du cœur ; le concept de cœur « en creuset », dans lequel la différence de hauteur des zones fissiles interne et externe augmente l'effet de fuite des neutrons du plénum et contrebalance ainsi l'apport de réactivité en cas de vidange.

Les développements réalisés se sont appuyés sur les résultats d'études expérimentales et de simulations numériques. Pour maîtriser la spécificité du cœur CFV et certifier les calculs, plusieurs programmes ont été menés par les équipes du CEA. Il s'agit en particulier d'essais effectués en Russie sur un réacteur expérimental et d'analyses comparatives menées indépendamment par le CEA et le DOE (le Department of Energy des États-Unis), qui ont toutes les deux confirmé les performances de ce cœur.

« Le CEA a développé des partenariats internationaux afin de renforcer et multiplier ses efforts de R&D. »

Les pompes électromagnétiques (destinées à faire circuler le sodium dans la boucle secondaire) ; Airbus Defence and Space intervient sur la fiabilité et sûreté de fonctionnement ; Alcen sur les cellules d'examen des objets irradiés ; JAEA, MHI et MFBR, sur la conception de systèmes de sûreté d'*Astrid* et sur la R&D associée ; Rolls-Royce sur les échangeurs compacts sodium-gaz et la manutention du combustible ; Velan sur la conception et le développement de vannes d'isolement du sodium sur la boucle secondaire, et Technetics Group France sur le développement de systèmes d'étanchéité en environnement sodium.

En parallèle, le CEA a développé un ensemble de partenariats internationaux afin de renforcer et multiplier ses efforts de R&D. Ils permettent de partager les coûts de développement et d'utilisation d'infrastructures expérimentales lourdes, telles que les laboratoires d'études en sodium ou d'études des matériaux irradiés.

En Europe, les partenariats sont inscrits soit au niveau communautaire, sous l'égide de l'initiative ESNII dédiée aux programmes de quatrième génération, soit sous forme d'un ensemble de coopérations bilatérales dans le cadre du réseau de coopération Ardeco (*Astrid R&D European Cooperation*).

Hors Europe, ils procèdent d'initiatives multilatérales (le GIF évoqué précédemment) ou bilatérales, avec le Japon, dans le cadre d'un accord important signé avec les ministères MEXT et METI autour de la R&D et de l'ingénierie, avec la Russie, à travers un accord avec Rosatom pour des irradiations expérimentales de combustibles, avec l'Inde à travers l'IGCAR pour la sûreté, avec le Department of Energy des États-Unis pour des études de neutronique et de sûreté. Enfin, des contacts avec la Chine ont été noués en vue d'un futur partenariat. ■

© Pour la Science - n° 456 - Octobre 2015

Des lasers ultrabrefs

Philippe Martin

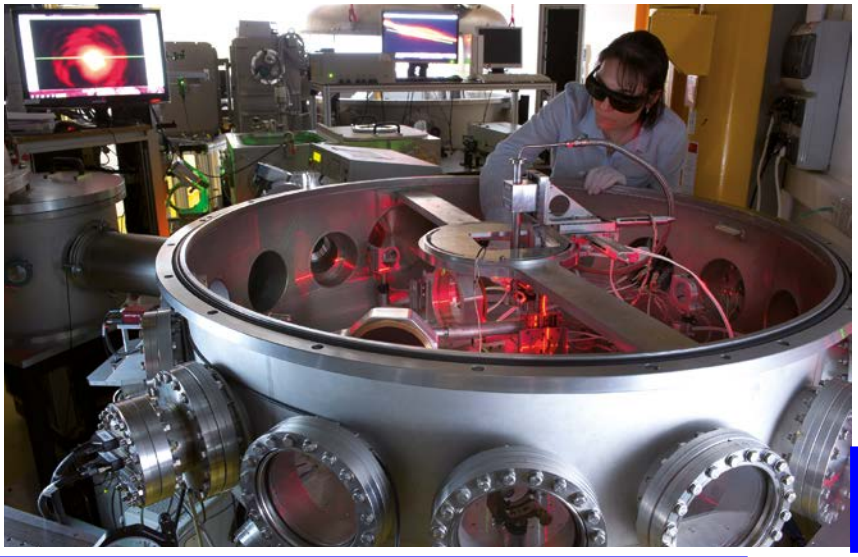
La production de rayons lumineux d'une brièveté inouïe donne l'accès à de nouveaux moyens d'observation et à d'autres outils inédits

Voir des électrons se déplacer, les propulser à la vitesse de la lumière… voilà des utilisations du laser qui n'ont probablement pas été imaginées lors de son invention !

Les lasers « ultrabrefs » sont caractérisés par la brièveté de leurs impulsions : quelques femtosecondes (1 fs = 10^{-15} s), soit seulement quelques oscillations du champ électromagnétique dans le cas d'une lumière visible. Cette fugacité leur impose un très large spectre de fréquences, comme l'indique le principe de Fourier selon lequel seul un nombre infini d'oscillations permet de définir une fréquence unique et précise. Ainsi, contrairement à une idée répandue, un laser n'est pas nécessairement monochromatique.

On connaît aujourd'hui deux intérêts majeurs présentés par les lasers ultrabrefs.

D'une part, ils sont à l'origine d'une science récente, dite ultrarapide. Par exemple, dans une expérience « pompe-sonde », une première impulsion (la pompe) excite un système moléculaire en fragmentant des molécules ; grâce à la seconde impulsion (la sonde), l'état du système peut être connu un bref instant après l'excitation. Il est ainsi possible de décrire une séquence très rapide de ruptures ou de formations de liaisons chimiques, avec la perspective de les contrôler. Depuis quelques années, on sait même utiliser ces lasers pour produire des impulsions lumineuses mille fois plus courtes, de quelques attosecondes (1 as = 10^{-18} s), grâce auxquelles on peut suivre « pas à pas » le déplacement d'électrons dans la matière ! Le laboratoire Attolab, un équipement d'excellence financé par le programme Investissements d'avenir, est dédié à ce nouveau champ d'études parfois nommé attoscience. Il doit être mis en service en 2016 à l'université Paris-Saclay. Les physiciens et les chimistes qui l'utiliseront pourront réaliser des observations avec une résolution d'une attoseconde dans le temps et d'un ångström (10^{-10} m) dans l'espace.



L'ENCEINTE D'INTERACTION du laser UHI100 (100 térawatts de puissance crête) en cours de mise au point au CEA-Saclay.

Plus de 100 fois la puissance électrique mondiale

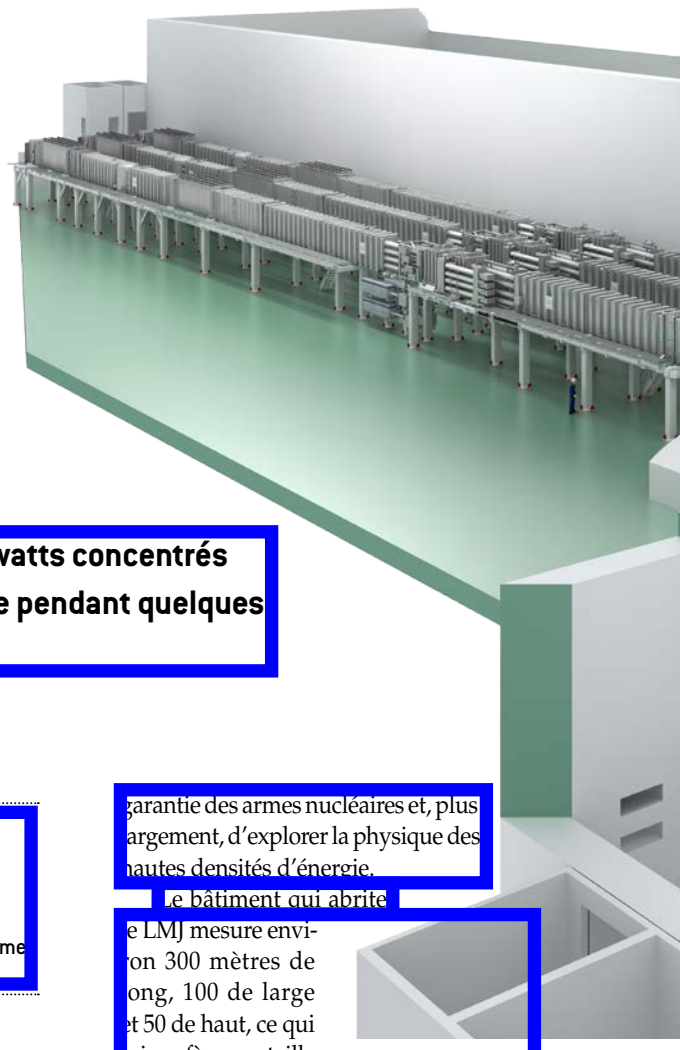
D'autre part, en concentrant fortement l'énergie lumineuse dans le temps, ces lasers atteignent des puissances instantanées gigantesques, de l'ordre du pétawatt (1 PW = 10^{15} watts) ; on parle de laser UHI (ultra-haute intensité). Ainsi, un seul d'entre eux, occupant quelques centaines de mètres carrés seulement, délivre un faisceau de lumière dont la « puissance crête » est plus de cent fois supérieure à toute la puissance électrique produite dans le monde – mais cela pendant quelques femtosecondes uniquement !

Le laser Mégajoule (LMJ), quant à lui, atteint une telle puissance mille fois plus longtemps. Cependant, les lasers UHI offrent des perspectives scientifiques différentes du LMJ car il est possible de les focaliser sur une surface de quelques micromètres carrés, où ils créent un champ électromagnétique si intense qu'il peut propulser des électrons à 99,999 % de la vitesse de la lumière.

Des études sont menées dans différents pays pour construire des accélérateurs de particules très compacts recourant aux lasers UHI. Les applications envisagées concernent la recherche fondamentale en général et la médecine en particulier : la destruction de cellules tumorales par un faisceau de particules rapides (radiothérapie) pourrait tirer profit d'accélérateurs à la fois plus compacts et moins chers. ■

Philippe MARTIN est chercheur à l'Iramis, Institut rayonnement matière du CEA-Saclay. Il y dirige le laboratoire interactions, dynamiques et lasers.

Mégajoule, laser de l'extrême



Pierre Vivini et Charles Lion

Vingt ans d'études et de travaux, 400 000 milliards de watts concentrés sur une cible millimétrique par 176 faisceaux de lumière pendant quelques milliardièmes de seconde… voici le laser Mégajoule !

Le laser Mégajoule (LMJ) est un grand équipement scientifique dédié à la réalisation des expériences de physique nécessaires à la pérennisation de la force de dissuasion nucléaire française. Au sein de cette installation, des faisceaux laser de très forte puissance sont créés puis concentrés sur une cible. La caractérisation des interactions de ces faisceaux avec la cible (dont la nature varie en fonction des expériences) permet de valider les modèles utilisés pour la garantie des armes nucléaires et, plus largement, d'explorer la physique des hautes densités d'énergie.

Pierre Vivini est ingénieur à la Direction des applications militaires (DAM) du CEA. Il est le chef du projet laser Mégajoule (LMJ). Charles Lion dirige le programme simulation à la DAM.

Le bâtiment qui abrite le LMJ mesure environ 300 mètres de long, 100 de large et 50 de haut, ce qui lui confère une taille gigantesque comparée aux dimensions millimétriques de la cible.

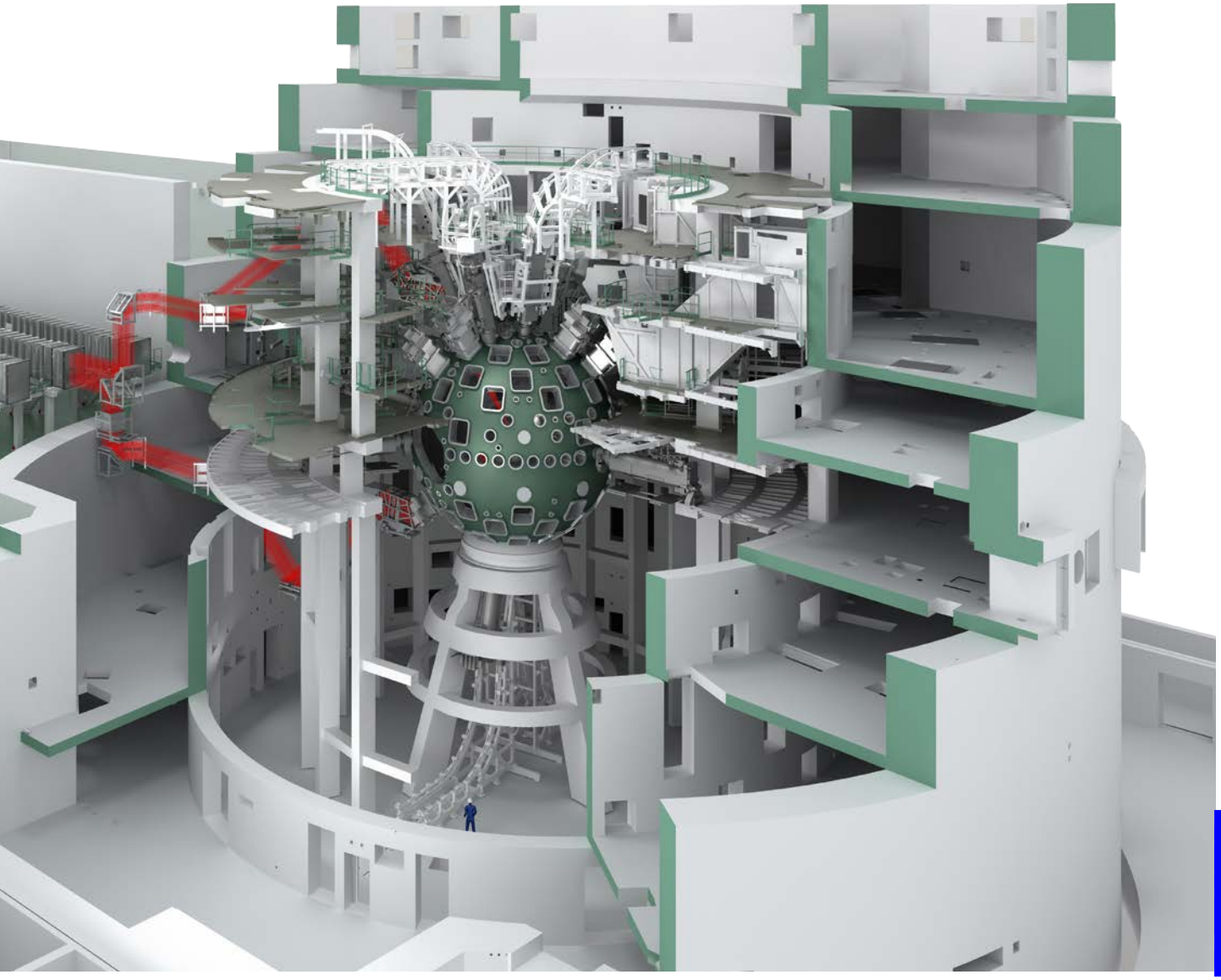
Dans la configuration nominale, 176 faisceaux laser infrarouges sont générés dans quatre grands « halls laser », puis sont amplifiés avant d'être convertis en lumière ultraviolette (UV) et focalisés au centre de la chambre d'expériences. L'énergie totale transportée par les faisceaux peut atteindre 1,4 mégajoule sur une durée comprise entre 0,3 et 25 nanosecondes (milliardièmes de seconde), soit une puissance maximale de 400 térawatts (1 TW= 10^{12} watts).

Le fonctionnement du LMJ fait appel à deux grands sous-systèmes : le « sous-système laser », qui produit et transporte les faisceaux jusqu'à la chambre d'expériences et le « sous-système expériences » où les lasers atteignent leur cible et qui assure le recueil des données expérimentales en temps réel.

Le sous-système laser est distribué dans 22 chaînes réparties dans les quatre halls,

LE BÂTIMENT DU LMJ, situé au Barp (Gironde), au sein du Cesta, le Centre d'études scientifiques et techniques d'Aquitaine. De part et d'autre du hall d'expériences s'étendent les quatre halls laser. L'ensemble mesure près de 300 mètres de long.

© Pour la Science - n° 456 - Octobre 2015



LE LASER MEGAJOULE. Cette vue schématique montre trois chaînes d'amplification (qui comportent chacune huit faisceaux laser) parmi les vingt-deux chaînes du LMJ, et le hall d'expériences avec la chambre d'expériences en son centre.

chaque chaîne produisant deux groupes de quatre faisceaux ou « quadruplets ». Il comporte un « pilote », une « section amplificatrice » et un « système de conversion de fréquence et de focalisation ».

Une amplification gigantesque

Le pilote comporte deux sous-ensembles : la source (une par hall laser) et le module préamplificateur (MPA).

La source crée l'impulsion lumineuse et la met en forme temporellement et « spectralement ». La longueur d'onde du faisceau infrarouge est alors de 1 053 nanomètres avec une variation maximale, de part et d'autre de cette valeur, de 5 picomètres (1 pm = 10^{-12} m). Cette stabilité est cruciale pour le bon fonctionnement du LMJ. En sortie de la source, l'énergie du faisceau est de un nanojoule.

Le MPA (il y en a quatre par chaîne) a pour fonction de réaliser une préamplification du faisceau pour amener son énergie au niveau du joule. Ce gain d'un facteur un milliard est obtenu par un passage dans une cavité régénérative et par quatre passages dans un amplificateur. De plus, le MPA met en forme spatialement le faisceau ; il ajuste ainsi la répartition de son énergie.

Le rayonnement infrarouge qui sort du pilote doit encore être amplifié dans la section amplificatrice afin d'atteindre l'énergie requise pour les expériences : jusqu'à 18 kilojoules. Cette amplification est acquise par quatre passages au travers de deux amplificateurs (T et C) constitués de plaques de verre phosphate dopé au néodyme qui stockent puis restituent l'énergie fournie par des lampes flash. Faire passer ainsi le faisceau quatre fois dans deux amplificateurs, plutôt qu'une fois dans huit amplificateurs, permet de limiter la longueur de la chaîne, donc celle du bâtiment, et le nombre de plaques nécessaires.

Positionnées entre les deux amplificateurs, des lentilles associées à un diaphragme suppriment les modulations parasites. Deux miroirs, M1 et M2, assurent les allers-retours du faisceau. En bout de chaîne se trouve la cellule de Pockels à électrodes plasma (PEPC), un élément de protection de la chaîne laser. Associée à un polariseur, elle constitue un obturateur optique qui laisse

passer le faisceau lors de ses quatre passages et bloque les rayonnements parasites. La surface du miroir M1 est déformée par de petits actionneurs afin de corriger les légères modulations parasites du faisceau.

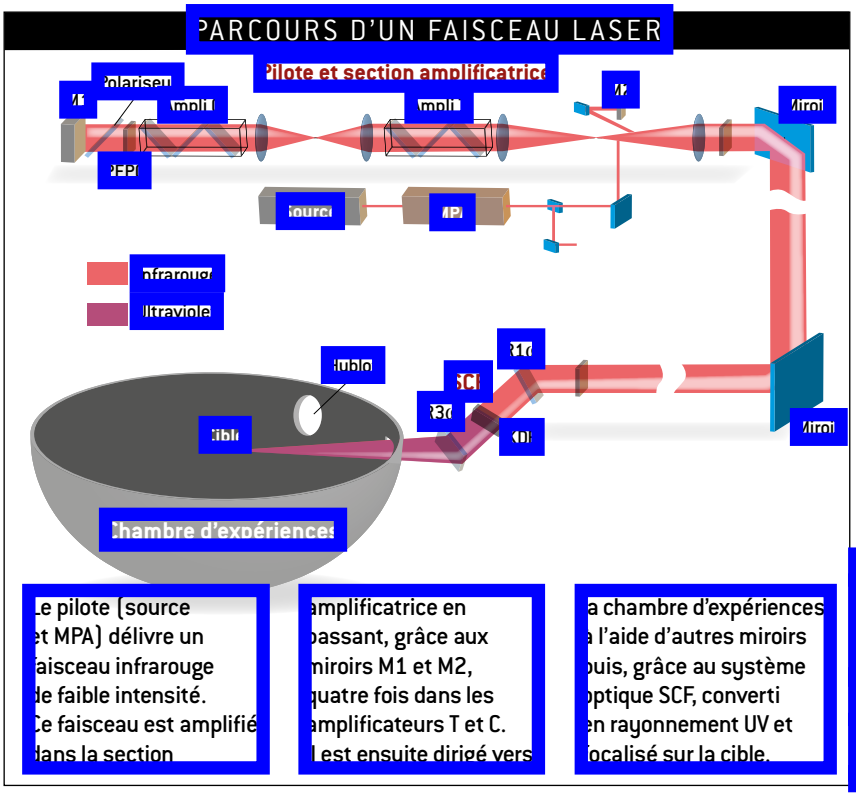
Les faisceaux se propagent ensuite sur plus de 40 mètres vers la chambre d'expériences. Les deux quadruplets de chaque chaîne sont séparés et dirigés grâce à six miroirs, l'un vers la partie supérieure et l'autre vers la partie inférieure de la chambre.

Des rayons UV très concentrés

Avant d'entrer dans cette dernière, la lumière infrarouge est convertie en rayonnement UV et focalisée au centre de la chambre. Ces deux opérations sont réalisées par le système de conversion de fréquence et de focalisation (SCF). La conversion répond aux besoins des expériences : nombre d'entre elles nécessitent un rayonnement X que seuls des rayons UV peuvent produire sur la cible de facon efficace.

Le SCF est composé d'un premier réseau de diffraction (R1ω) qui dévie de 50 degrés le faisceau infrarouge, puis de deux cristaux de KDP (di-phosphate hydrogéné de potassium) qui transmettent le rayonnement avec une fréquence double puis triple de celle du faisceau incident, portant ainsi la longueur d'onde à 351 nanomètres (UV). Il comporte enfin un second réseau (R3ω) qui défléchit de nouveau la lumière de 50 degrés, la lumière résiduelle non convertie en UV étant bloquée par des absorbeurs, et la focalise avec une précision de pointage de 50 micromètres sur la cible.

PARCOURS D'UN FAISCEAU LASER



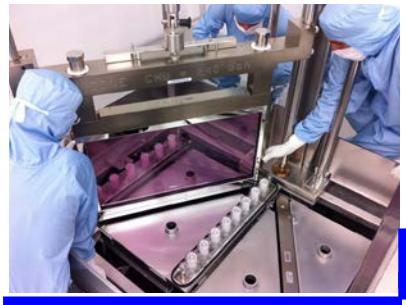
Le pilote (source et MPA) délivre un faisceau infrarouge de faible intensité. Ce faisceau est amplifié dans la section amplificatrice en passant, grâce aux miroirs M1 et M2, quatre fois dans les amplificateurs T et C. Il est ensuite dirigé vers la chambre d'expériences à l'aide d'autres miroirs puis, grâce au système optique SCF, converti en rayonnement UV et focalisé sur la cible.

Un projet aux défis monumentaux

Le laser Mégajoule est une installation expérimentale hors du commun, si l'on se réfère à sa taille, son coût (3,1 milliards d'euros hors taxe, aux conditions économiques de 2015) et à sa très grande complexité. Seuls les États-Unis disposent à ce jour d'une installation similaire, la National Ignition Facility, située en Californie.

Le LMJ a mobilisé pendant vingt ans plusieurs centaines de personnes au CEA et chez ses partenaires industriels. De sa conception à sa mise en service, il a fallu développer de nouvelles technologies, mettre au point de nouvelles techniques et amener l'industrie française au niveau requis pour réaliser certains systèmes.

De nombreuses PME ont atteint l'excellence technologique grâce au LMJ, telle GreenField Technology en développant les systèmes électroniques



UNE PLAQUE D'AMPLIFICATION LASER (verre phosphate dopé au néodyme) en cours de montage.

qui synchronisent les faisceaux à quelques millionièmes de millionième de seconde près, ou ISP System en réalisant les actionneurs des miroirs adaptatifs M1.

L'optique mérite d'ailleurs une attention particulière. Le LMJ comporte en effet quelque 7000 optiques de grandes dimensions : en plus de leur extrême précision de courbure et de rugosité, elles supportent des fluences (flux de lumière) jusque-là jamais atteintes.

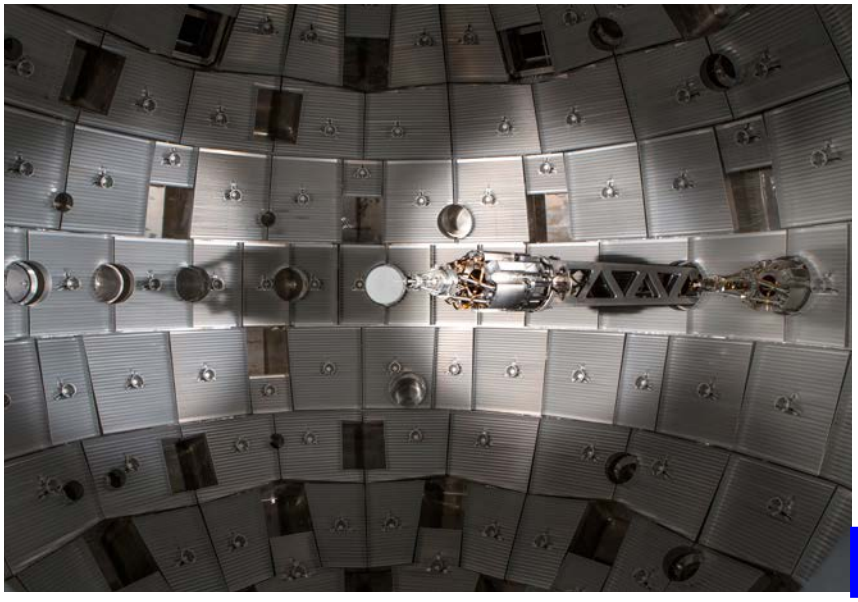
Quant à l'accompagnement des entreprises par le CEA, l'exemple de la société SESO est notable. Le CEA a investi pendant plusieurs années dans cette société (rachetée au cours du projet par le groupe Thales pour devenir Thales/SESO) pour la doter des technologies et des machines de polissage des optiques qui la placent aujourd'hui au meilleur niveau mondial. Elle a connu récemment une forte croissance, ses effectifs passant de 70 personnes en 2012 à 100 en 2014.

Le laser Mégajoule, avec ses exigences de performances très au-dessus des standards industriels, restera une référence de classe mondiale pour les mille entreprises qui ont contribué à sa réalisation.

© Pour la Science - n° 456 - Octobre 2015

La chambre d'expériences est une sphère d'aluminium de 10 mètres de diamètre percée de hublots qui permettent le passage des faisceaux laser, ainsi que le positionnement des appareils de mesure et du bras qui porte la cible. Son intérieur est vide d'air lors des expériences. Sa paroi en aluminium, de 10 centimètres d'épaisseur, est recouverte de 40 centimètres de béton dopé au bore, un élément qui absorbe efficacement les neutrons. Des panneaux d'aluminium la protègent des matériaux éjectés de la cible. Les 44 quadruplets pénètrent la chambre par autant de hublots différents.

Dans la chambre est aussi introduite la « référence commune ». Cet équipement comportant des miroirs fait partie d'un système qui permet d'aligner les SCF et les capteurs de mesure pour le diagnostic des expériences. La cible, quant à elle, est positionnée au centre de la chambre avec une précision inférieure à 10 micromètres.



BRAS PORTE-CIBLE à l'intérieur de la chambre d'expériences, tapissée de panneaux de protection.

Des expériences de validation et d'exploration

Le LMJ a été dimensionné pour produire, sur la cible, des températures de plusieurs dizaines de millions de degrés et des pressions dépassant le milliard de fois celle de l'atmosphère terrestre, des conditions qui existent seulement au sein des étoiles et des armes nucléaires en fonctionnement.

En octobre 2014, le LMJ a été mis en service opérationnel et a réalisé avec succès ses premières expériences de physique. Il s'agissait d'étudier l'interaction du rayonnement X avec la matière : comment ce rayonnement se propage et met en mouvement très rapide cette matière. Les faisceaux laser ont atteint une pièce métallique fendue de 4 millimètres de diamètre. L'évaporation des bords de la fente a été observée pendant quelques milliardièmes de seconde. Confrontée aux résultats des calculs de prévision, cette observation permet de valider ou d'ajuster les modèles relatifs à ce phénomène.

La conversion de la lumière laser en rayonnement X et la production d'ions fortement accélérés feront également l'objet d'expérimentations. D'autres aspects du comportement de la matière dans des conditions extrêmes, tels que les instabilités hydrodynamiques et la turbulence, seront examinés. Certaines cibles comporteront des mélanges fusibles de deutérium et de tritium pour tester les modèles de fonctionnement des armes thermonucléaires, dans lesquelles une telle fusion se produit.

Ces phénomènes de fusion ou de turbulence interviennent également lors de l'explosion des étoiles ; aussi le LMJ offre-t-il la possibilité exceptionnelle de mettre à l'épreuve des modèles de fonctionnement stellaire. Entre 20 et 25 % du temps d'expérience seront accessibles à la communauté académique pour explorer la physique mal connue des hautes densités d'énergie. ■

Le programme Simulation

Lancé en 1996, le programme Simulation vise à pérenniser la dissuasion française après l'arrêt définitif des essais nucléaires. Il a été bâti pour permettre le renouvellement et la garantie sur le long terme des armes qui équipent les composantes aéroportée et océanique de la dissuasion nucléaire française.

L'atteinte de tels objectifs a nécessité de développer ce programme suivant trois axes. Le premier axe porte sur la physique des armes nucléaires et consiste à établir les équations qui modélisent les phénomènes intervenant lors du fonctionnement de ces armes. Le deuxième axe est celui de la simulation numérique, qui regroupe l'écriture des applications informatiques et l'acquisition des calculateurs de puissance nécessaires à la résolution de ces équations. Le troisième axe est la validation expérimentale : des expériences menées en laboratoire sont destinées à valider les différents modèles, séparément ou dans leur enchaînement.

Le laser Mégajoule (LMJ) est l'un des deux grands équipements sur lesquels s'appuie la validation expérimentale, l'autre étant l'installation de radiographie Épure, située en Côte-d'Or. Épure sert à étudier le comportement des matériaux dans la phase dite pré-nucléaire qui précède la libération de l'énergie nucléaire (le « fonctionnement nucléaire ») d'une arme, tandis que l'énergie du LMJ déposée sur une cible y crée des conditions de température et de pression relevant des hautes densités d'énergie, similaires à celles du fonctionnement nucléaire d'une arme et présentes également au cœur des étoiles.

UNE SCINTIGRAPHIE effectuée au Service hospitalier Frédéric-Joliot du CEA, à Orsay.

Mieux voir le corps

Régine Trebossen et Patrick Philipon

Fort de son expertise en physique nucléaire, le CEA est devenu peu de temps après sa création un acteur majeur de l'innovation en imagerie médicale. Celle-ci a bouleversé le diagnostic médical et, plus largement, la médecine.

Examiner l'intérieur d'un matériau ou celui d'un organisme vivant sans l'ouvrir n'est plus un rêve depuis la découverte des rayons X par Wilhelm Röntgen, en 1895. La plupart des avancées réalisées dans ce domaine dérivent directement de la recherche en physique nucléaire et des développements technologiques qu'elle implique, en électronique, en matériaux, en informatique, en robotique...

C'est un autre « pionnier des rayonnements », Frédéric Joliot, qui a grandement contribué à lancer le CEA sur la voie de l'imagerie médicale. Cet ensemble de techniques permet d'observer les organes et leur fonctionnement, de diagnostiquer des maladies, de valider de nouveaux traitements et d'évaluer leurs bénéfices. L'imagerie nucléaire et l'imagerie par résonance magnétique (IRM) font partie de ces applications devenues

Régine Trebossen est coordonnatrice exécutive de l'infrastructure France Life Imaging et de la communication à l'Institut d'imagerie biomédicale du CEA, au service hospitalier Frédéric-Joliot.
Patrick Philipon est journaliste scientifique

© Pour la Science - n° 456 - Octobre 2015

incontournables aujourd'hui et qui ont bénéficié de contributions décisives de la part du CEA.

Le 15 décembre 1948, *Zoé*, première « pile atomique » française, entre en fonctionnement dans le berceau originel du CEA, à Fontenay-aux-Roses. François Morel, le premier médecin biologiste du CEA, y développe une « imagerie du corps en fonctionnement » grâce aux atomes radioactifs fournis par *Zoé*. Il marque de la thyroxine à l'iode 131 pour étudier la thyroïde puis se consacre à la physiologie du rein. À *Zoé* succèdent les réacteurs EL2, EL3 et *Osiris*, construits au Centre d'études nucléaires de Saclay (CEN), ouvert en 1952. Lancés entre 1953 et 1966, ils resteront longtemps les seuls producteurs de radio-isotopes médicaux en France.

De *Zoé* au réacteur Jules-Horowitz

Dès 1953, les études de radiobiologie et d'imagerie, désormais relocalisées à Saclay, se diversifient à l'aide d'éléments comme l'iode 131, l'or 198 sous forme colloïdale, le mercure 203 ou le xénon 133. Ces émetteurs de rayons gamma n'ont pas tous les mêmes usages car ils ne se fixent pas indifféremment dans les tissus ou sur les molécules utilisées pour les véhiculer dans le corps : les radio-isotopes de l'iode, par exemple, sont adaptés à l'étude de la thyroïde car l'iode est retenu par cet organe ; l'or 198 colloïdal se fixe préférentiellement dans le foie et la vésicule biliaire ; le mercure dans les reins… Les physiciens et les électroniciens du CEA développent les détecteurs « à scintillation » destinés à suivre les radionucléides injectés dans l'organisme. Les images qui en sont issues restent cependant sommaires ; l'imagerie scintigraphique telle qu'on la connaît aujourd'hui naît en 1957, lorsque l'Américain Hal Anger invente, à Berkeley, la caméra à scintillation. De multiples cristaux scintillants captent les photons gamma puis un dispositif de localisation et d'amplification en fait une image sur une plaque photographique (et, plus tard, sur un écran d'ordinateur).

Les premières scintigraphies cliniques sont réalisées aux États-Unis en 1958. L'année suivante, le CEA inaugure à l'hôpital d'Orsay un service dédié à l'utilisation médicale des radio-isotopes : le service hospitalier Frédéric-Joliot (SHFJ). Grâce à l'appui des ingénieurs du département d'électronique du CEN, la première caméra à scintillation de France y est installée en 1961. D'autres types de caméra sont employés par la suite. Le CEA, avec notamment son Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information (Leti) situé à Grenoble, poursuit aujourd'hui la R&D sur les détecteurs et sur l'électronique associée pour l'imagerie X et gamma. En particulier, des détecteurs en matériaux semi-conducteurs à base de tellure de cadmium ont amélioré la qualité des images alors même que l'irradiation des patients était réduite. Ces détecteurs sont à l'origine d'autres innovations : l'imagerie spectrale qui recourt à au moins deux faisceaux de rayons X d'énergies différentes, offrant ainsi un meilleur contraste que le scanner X classique, et la toute récente « imagerie K-edge », également spectrale, qui utilise des faisceaux X d'énergies différentes afin de mesurer la concentration de certains éléments présents dans les tissus de l'organisme.

L'entrée de la biologie au CEA

Le 18 octobre 1945, Charles de Gaulle signe l'ordonnance qui institue le Commissariat à l'énergie atomique. Le nouvel organisme a pour mission de « *poursuivre les recherches [sur] l'utilisation de l'énergie atomique dans les divers domaines de la science, de l'industrie et de la défense nationale* ».

Frédéric Joliot, inventeur de la radioactivité artificielle avec Irène Curie, est nommé Haut-Commissaire. Si le gouvernement provisoire de la République française pense avant tout à l'arme nucléaire et à la production d'énergie, le texte laisse toutefois le CEA libre d'explorer toutes les possibilités de la physique nucléaire.

Dès les années 1930, le Hongrois Georges de Hevesy utilisait des isotopes radioactifs comme traceurs de fonctions biologiques et métaboliques. L'administration de molécules biologiques sur lesquelles sont greffés des atomes radioactifs afin de suivre, au moyen d'un détecteur de radiations, leur cheminement dans l'organisme et leur éventuelle concentration dans un organe ou une tumeur cancéreuse.

APPAREIL DE SCINTIGRAPHIE en 1959

est le principe fondateur de l'imagerie de médecine nucléaire. En recevant le prix Nobel de chimie en 1935, conjointement avec Irène Curie, Frédéric Joliot soulignait déjà l'utilité des radio-isotopes pour localiser des « éléments divers introduits dans les organismes vivants ». Aussi souhaita-t-il que la biologie entre au CEA.

Dans ce domaine, le CEA se consacrera à la radioprotection, à la radiobiologie et à l'utilisation des radio-isotopes comme traceurs, qui débouchera sur l'imagerie médicale. Ses avancées en physique nucléaire et ses ressources technologiques irrigueront tout naturellement ce domaine d'activité.

LE REACTEUR *OSIRIS* lors d'une opération de manutention en piscine. Mis en service à Saclay en 1966 et dédié à la recherche en physique nucléaire, il produit également des radio-isotopes d'intérêt médical.

Sur le front des marqueurs, une révolution intervient au début des années 1960 lorsque l'Américain Powell Richards introduit l'usage clinique du technétium 99m. Ce radio-isotope a plusieurs atouts : sa demi-vie (temps au bout duquel la moitié des radionucléides se sont désintégrés) est de six heures, ce qui convient pour un usage médical ; il dérive du molybdène 99 (produit notamment par *Osiris*), dont la demi-vie de trois jours convient bien au transport ; il peut être greffé sur de nombreuses molécules biologiques ou pharmaceutiques… Il devient rapidement le principal marqueur utilisé en scintigraphie médicale. Aujourd'hui encore, *Osiris* est l'un des rares fournisseurs de technétium 99m au monde. Il sera arrêté fin 2015. Le nouveau réacteur de recherche *Jules-Horowitz* devrait lui succéder à l'horizon 2020 à Cadarache. Par ailleurs, une méthode de production de technétium 99m par des cyclotrons est en cours de développement.

LA PREPARATION DE MOLECULES radiopharmaceutiques marquées au fluor 18 et au carbone 11, effectuée dans une chambre protégée de la plateforme d'imagerie biomédicale Cuceron, à Caen.

La révolution de la TEP

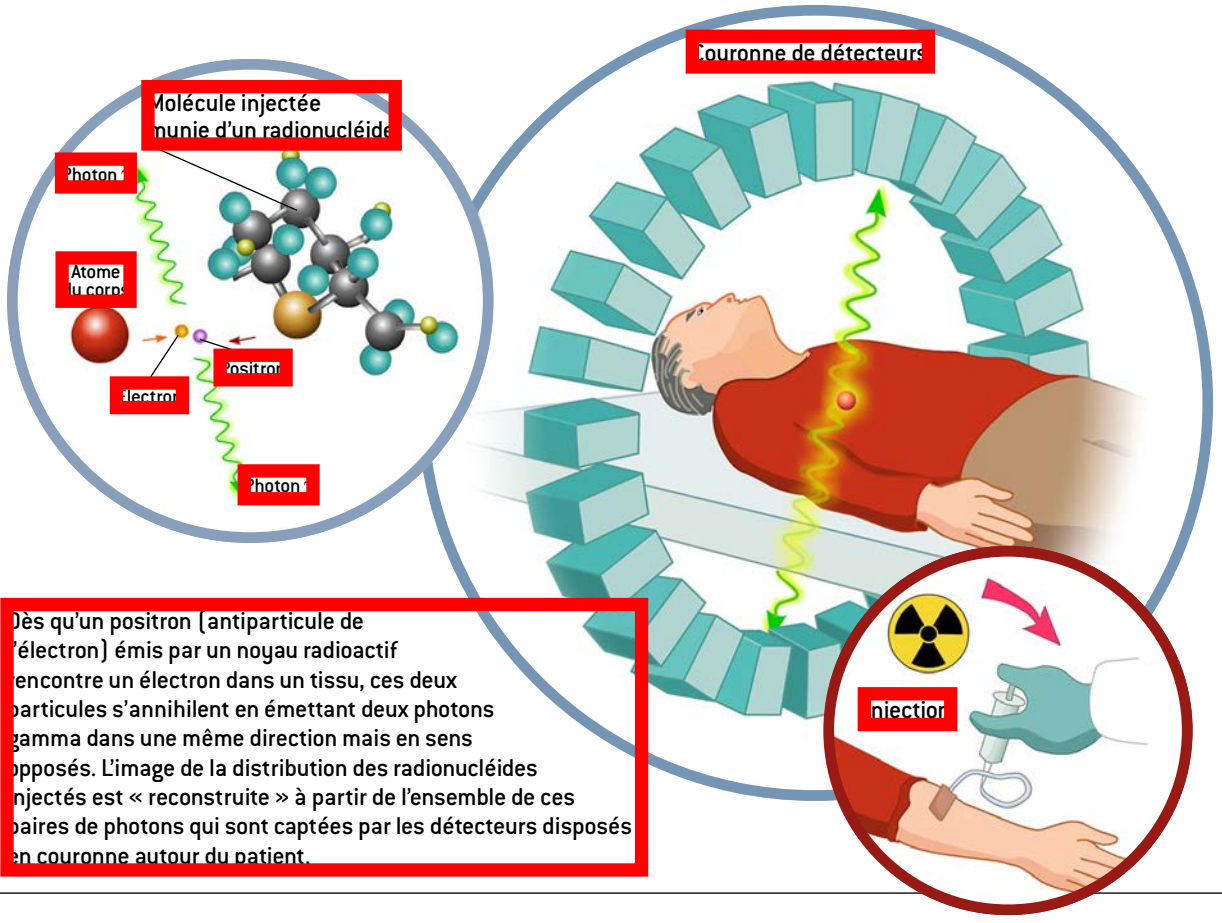
La tomographie par émission de positrons (TEP) est née à la même époque que la scintigraphie mais son usage a été plus tardif. Elle repose sur la détection de photons gamma qui ne sont pas émis directement par les radionucléides injectés mais sont émis par paires, en sens opposés, lorsqu'un positron émis par un radionucléide (radioactivité β^+) rencontre un électron du tissu étudié. Grâce aux détecteurs installés autour du patient, cette opposition donne des informations sur les lieux d'émission des photons. Un algorithme mis au point en 1970 reconstruit ensuite la distribution des radionucléides dans l'organisme.

Cependant, la brièveté des demi-vies des émetteurs de positrons oblige à les produire à proximité du site d'imagerie. Des isotopes tels que le fluor 18 (demi-vie de 110 minutes), le carbone 11 (20 minutes) et l'oxygène 15 (2 minutes) sont obtenus en bombardant des noyaux stables par des particules légères (protons, deutons) dans un accélérateur, tel un cyclotron, par exemple. Au CEA, des molécules biologiques sont marquées dès les années 1970 par ces émetteurs β^+, obtenus grâce aux réacteurs EL3, *Osiris* et par un cyclotron, puis transportés en voiture au SHFJ, distant de cinq kilomètres. Cette pratique contraignante perdure jusqu'en 1975, année d'installation du cyclotron CGR Mev 520 au SHFJ. Entre-temps, ce dernier est devenu un centre de renommée mondiale pour la synthèse et le marquage radioactif de traceurs biologiques pour la TEP.

Au début des années 1980, le CEA est l'un des premiers organismes à tenter d'exploiter la « mesure du temps de vol » des photons pour rendre la TEP plus précise. Cette technique mesure la différence des temps d'arrivée des photons d'une paire sur les détecteurs pour localiser la source de leur émission. Elle avait été proposée dès les débuts de la TEP mais les détecteurs et l'électronique de l'époque n'étaient

© Pour la Science - n° 456 - Octobre 2015

LE PRINCIPE DE LA TEP



Dès qu'un positron (antiparticule de l'électron) émis par un noyau radioactif rencontre un électron dans un tissu, ces deux particules s'annihilent en émettant deux photons gamma dans une même direction mais en sens opposés. L'image de la distribution des radionucléides injectés est « reconstruite » à partir de l'ensemble de ces paires de photons qui sont captées par les détecteurs disposés en couronne autour du patient.

pas assez précis. En dépit de capacités de comptage inédites, les deux prototypes construits par le Leti ne se montrent pas assez performants pour le diagnostic clinique des cancers ; aussi la technique est-elle abandonnée au début des années 1990. Elle réapparaît vers 2010, grâce à la mise au point de nouveaux détecteurs, pour équiper rapidement tous les appareils commerciaux.

La TEP est une excellente méthode d'imagerie fonctionnelle : grâce à sa cadence d'acquisition pouvant atteindre une image toutes les deux secondes, elle permet d'observer des changements brefs dans l'organisme et donc de suivre des processus biologiques rapides. Elle ne fournit cependant pas de repères anatomiques précis ; c'est pourquoi elle est toujours couplée à un scanner X.

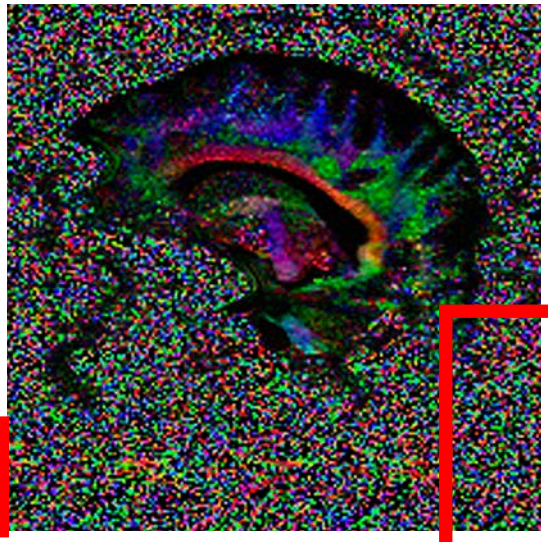
Les constructeurs développent actuellement des systèmes plus précis qui couplent la TEP et l'IRM. Un tel équipement vient d'être installé au SHFJ. C'est le troisième en France après ceux du Centre de recherche médicale par émission de positrons, à Lyon, et de l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière, à Paris. Il sera ouvert aux centres de recherche et aux centres hospitaliers de l'Île-de-France pour des collaborations cliniques et de recherche.

Une IRM toujours plus performante

C'est en s'appuyant sur un phénomène physique très différent de la radioactivité que l'IRM a été conçue : placés dans un champ magnétique et excités par une onde électromagnétique appropriée, certains noyaux atomiques absorbent une partie de cette énergie d'excitation puis la réémettent avec une fréquence particulière dans le domaine radio. Il a fallu attendre 35 ans après la découverte de cette « résonance magnétique nucléaire » (RMN), en 1938, pour qu'elle soit exploitée en médecine.

Le CEA a pris part aux développements nécessaires à cette exploitation grâce notamment à Anatole Abragam, qui a fondé en 1955 le Laboratoire de résonance magnétique à Saclay, et à Maurice Goldman, qui a rejoint ce laboratoire. Depuis le début des années 1950, on sait que la fréquence de résonance d'un noyau dépend des liaisons chimiques dans lesquelles il est engagé. La RMN est donc utilisée pour déterminer la nature et la structure de molécules en solution ou en milieu solide, mais c'est seulement en 1969 que l'Américain Raymond Vahan Damadian propose d'appliquer la spectroscopie RMN pour détecter des tissus cancéreux.

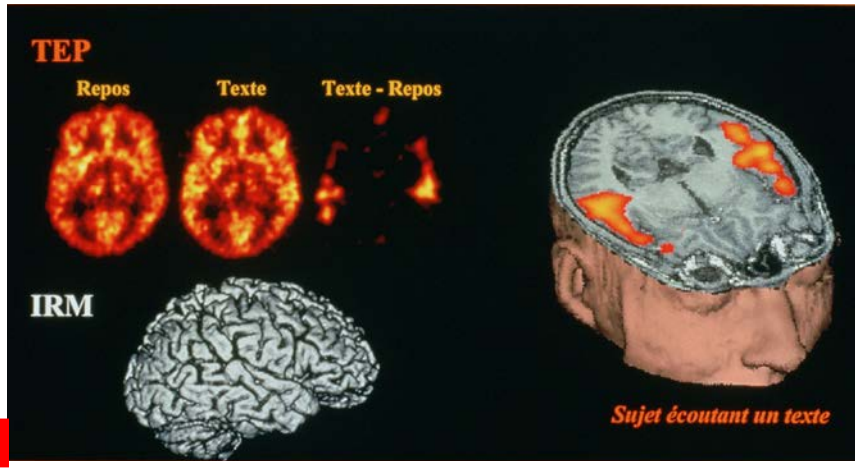
L'IRM naît en 1973 lorsqu'un autre Américain, Paul Lauterbur, a l'idée de faire varier dans l'espace le champ magnétique appliqué, afin de localiser les noyaux résonants. En 1977, le Britannique Peter Mansfield introduit la technique d'imagerie écho-planaire, qui accélère l'acquisition des images, et l'IRM pénètre le domaine médical dès les années 1980 : on dispose alors d'un champ magnétique assez intense pour obtenir une résolution d'image convenable. Une grande avancée en la matière est réalisée au CEA, avec l'appareil conçu sous l'égide des physiciens Jules



UNE ETUDE DE TRACTOGRAPHIE réalisée en IRM de diffusion sur le scanner IRM 7T de NeuroSpin à Saclay. Après reconstruction, ces données permettront de visualiser les faisceaux de fibres de la matière blanche du cerveau.

Horowitz, Anatole Abragam, Maurice Goldman, Maurice Guéron et André Syrota. Muni d'un aimant de deux teslas, cet appareil à haut champ – le premier au monde – est installé en 1984 au SHFJ, qui devient alors un centre pionnier de spectroscopie RMN *in vivo* et d'IRM.

Les utilisations de la RMN sont très diverses. On y recourait dès les années 1960 pour mesurer la diffusion de l'eau dans un milieu. En 1985, Denis Le Bihan et Éric Breton, au SHFJ, proposent d'en tirer une nouvelle modalité d'IRM, en supposant que l'eau ne diffuse pas de la même manière dans tous les types de tissus biologiques. Cette « IRM de diffusion » trouve bientôt son utilité en clinique, d'abord pour la détection précoce des ischémies cérébrales, ainsi que l'a découvert l'Américain Michael Moseley, puis pour celle des tissus cancéreux. En 1990, Michael Moseley constate que, dans la matière blanche cérébrale, l'eau ne diffuse pas de la même manière dans toutes les directions. Il est probable qu'elle soit dirigée préférentiellement le long des axones. En 1992, Peter Basser et Denis Le Bihan s'appuient sur ce résultat pour esquisser « l'IRM par tenseur de diffusion », avec laquelle, grâce à de nouvelles applications informatiques, il deviendra possible dès la fin des années 1990 de retracer le trajet intégral des fibres nerveuses (c'est la « tractographie »).



UN COUPLAGE DE TEP ET D'IRM. Grâce à la comparaison de deux images, l'une obtenue lors de l'audition d'un texte par le patient *(Texte)*, l'autre acquise lors d'un moment de silence *(Repos)*, la TEP met en évidence les zones cérébrales spécifiquement impliquées dans l'écoute. L'image résultante *(Texte – Repos)* est intégrée à une vue en coupe anatomique obtenue par IRM *(à droite)* afin de bien localiser ces zones dans le cerveau.

En 2007, l'ouverture de NeuroSpin à Saclay consacre l'expertise du CEA en matière d'IRM. Ce service rassemble toutes les techniques d'imagerie anatomique et fonctionnelle par RMN pour réaliser des études précliniques ou cliniques du cerveau. Le CEA y poursuit sa course vers l'IRM à très haut champ : depuis 2010, NeuroSpin dispose d'un aimant de 17,2 teslas de petit diamètre ; il s'apprête à en recevoir un autre, capable de délivrer 11,7 teslas dans un tunnel d'une largeur de 90 centimètres, suffisante pour y placer un être humain. L'imagerie du cerveau humain bénéficiera ainsi d'un niveau de performance unique au monde. Ce nouvel appareil est le fruit d'une collaboration entre Alstom, Siemens et le CEA, qui a mis à profit l'expertise en aimants supraconducteurs de son Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers. Il s'intègre dans un projet franco-allemand de développement des applications médicales de « l'IRM 11,7 T », dont l'IRM moléculaire.

Outre l'augmentation du champ, un moyen de collecter davantage de signaux en une passe, afin de rendre l'IRM encore plus précise et rapide, consiste à polariser les noyaux pour rendre leur réponse plus intense. Cette voie fait l'objet de recherches très actives à l'Iramis (Institut rayonnement matière du CEA).

Un enjeu pour les neurosciences

Accroître ainsi les capacités de l'imagerie anatomique et fonctionnelle intéresse particulièrement les neurosciences. Il s'agit, par exemple, de relier les connaissances du fonctionnement des neurones issues de l'observation microscopique à celles des activations de différentes régions cérébrales à l'échelle de la seconde, ou de détecter les agrégats de protéines anormales qui sont typiques de certaines maladies neurodégénératives, telles que la maladie d'Alzheimer. À Fontenay-aux-Roses, le Mircen (*Molecular Imaging Research Center*), un institut commun au CEA et à l'Inserm, développe et valide des techniques d'imagerie dédiées à ces fins.

Toutes ces avancées témoignent de l'importance prise par les recherches transversales qui, en imagerie, associent physique, électronique, mathématiques, informatique et biologie, et par lesquelles le CEA répond à de grands enjeux de santé publique. ■

© Pour la Science - n° 456 - Octobre 2015

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

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

fête de la Science .fr

fête de la Science

du 7 au 11 octobre 2015

CIEL ESPACE · POUR LA SCIENCE · familiscope · OKAPI · PHOSPHORE · ON N'EST PAS QUE DES COBAYES! · 5 · VINCI AUTOROUTES · 107.7

L'ESSENTIEL

- L'existence de tyrannosaures géants à la fin du Crétacé est connue depuis plus d'un siècle, mais les paléontologues ignoraient l'origine de ces animaux.
- De nouveaux fossiles viennent de fournir de précieux indices sur l'évolution des turannosaures.
- Les espèces de ce groupe étaient très modestes au début, il y a environ 170 millions d'années. Puis le groupe s'est diversifié et des superprédateurs géants sont apparus.

L'ascension des tyrannosaures

De nouveaux fossiles révèlent que les tyrannosaures sont passés, en 100 millions d'années, d'un groupe d'animaux de petites tailles à la famille de prédateurs géants qui a dominé la fin du Crétacé

Stephen Brusatte

Été 2010. Ganzhou, ville chinoise de la province du Jangxi. Un conducteur d'engin creuse des fondations quand sa pelle bute sur un obstacle. Quelque peu agacé, il descend inspecter, s'attendant à quelque vieille conduite métallique ou, pire, à une couche rocheuse qui retarderait les travaux de son équipe. Mais il est tout étonné de découvrir de vieux ossements, qu'il signale. S'il ne l'avait pas fait, nous aurions été privés d'une grande découverte paléontologique : le squelette presque complet d'une nouvelle espèce de tyrannosaure !

Quelque temps plus tard, mes collègues chinois me demandent de les aider à décrire ce cousin du *Tyrannosaurus rex*. En mai 2014, nous pouvons enfin annoncer la découverte de *Qianzhousaurus sinensis*. Le nom de ce dinosaure étant difficile à prononcer pour un Occidental, nous avons surnommé ce tyrannosaure à très long museau « Pinocchio rex ».

Qianzhousaurus fait partie de la série d'espèces découvertes qui est en train de changer notre vision des tyrannosaures. Au cours des quinze dernières années, une vingtaine d'espèces nouvelles de tyrannosaures ont été mises au jour dans le monde, que ce soit dans les déserts de Mongolie ou sous le cercle Arctique. Grâce à elles, les paléontologues ont reconstitué la généalogie de ce groupe. Le résultat est surprenant : pendant la plus grande partie de leur histoire, les tyrannosaures n'ont été qu'un groupe de modestes carnassiers. Ils n'ont acquis les grandes tailles et la position dominante au sommet de la chaîne alimentaire qu'on leur connaît qu'au cours des 20 derniers millions d'années de l'ère des dinosaures. Cette dernière, qui commence il y a 250 millions d'années, couvre le Trias, le Jurassique et le Crétacé ; elle s'achève il y a quelque 66 millions d'années, quand un astéroïde de 10 kilomètres de diamètre percute la Terre.

TROIS *DILONG*, des tyrannosaures de petite taille, défendent leur proie face à un grand *Yutyrannus* dans une forêt jurassique de ce qui deviendra la Chine.

Des origines modestes

Ainsi, loin d'appartenir à une famille de prédateurs géants, le monstre *Tyrannosaurus rex* a des origines modestes : il est le dernier survivant d'un groupe de dinosaures qui se diversifia assez pour parvenir à se répandre sur la Terre entière.

Depuis sa découverte il y a plus d'un siècle, *T. rex* dominait le spectacle dinosaurien, mais diminuait son intérêt aussi. Il y a peu de temps encore, on se bornait à constater avec fascination que les membres de cette espèce de la fin du Crétacé atteignaient 13 mètres de long et 5 tonnes. En outre, les paléontologues du XX^{e} siècle ont découvert quelques cousins du *T. rex*, eux aussi impressionnants. Cela les a persuadés que *T. rex*, loin d'être seulement une curiosité paléontologique, était l'aboutissement de toute une branche dinosaurienne. Dès lors, ils ont voulu comprendre comment et quand cette branche était apparue. En

d'autres termes, ils ont cherché à découvrir les formes anciennes de tyrannosaures.

La découverte du *T. rex* est le premier élément de cette longue histoire. Au début du XX^{e} siècle, Henry Fairfield Osborn était l'un des paléontologues les plus en vue des États-Unis. Président du Muséum d'histoire naturelle de la ville de New York et de l'Académie américaine des arts et des sciences, il était régulièrement en couverture du magazine *Time*, tribune dont il se servait pour promouvoir ses idées racistes et eugénistes. Cela lui vaut aujourd'hui d'être vu comme un douteux fanatique. Toutefois, Osborn était un excellent paléontologue doublé d'un bon administrateur scientifique. C'est lui qui prit l'heureuse initiative d'envoyer le collecteur de fossiles Barnum Brown à la recherche de fossiles de dinosaures dans l'Ouest américain.

Brown était un personnage haut en couleur, souvent vêtu d'un long manteau de fourrure en plein été, il ne dédaignait pas d'arrondir ses fins de mois en espionnant pour le compte de divers gouvernements et compagnies pétrolières. Il avait du flair pour trouver des fossiles. En 1902, il fit dans le Montana l'une des plus célèbres découvertes de toute l'histoire de la paléontologie: le squelette complet d'un carnivore géant.

Lors de la description de ce spécimen, quelques années plus tard, Osborn le nommera *Tyrannosaurus rex*, c'est-à-dire « roi des lézards-tyrans ». Osborn et Brown avaient découvert le plus gros et le plus féroce de tous les prédateurs ayant jamais vécu sur Terre…

Le *T. rex* est ensuite devenu la coqueluche des muséums et une vedette de cinéma. Mais il est resté dans le même temps une énigme scientifique. D'où pouvait provenir une telle espèce ? Les paléontologues ont eu le plus grand mal à la situer dans le cours de l'évolution. *T. rex* est si énorme et si différent des prédateurs que l'on connaissait jusque-là qu'il paraissait presque aberrant.

Au cours des décennies qui ont suivi la découverte de *T. rex*, quelques proches parents du grand prédateur ont été mis au jour. Ils lui sont contemporains, puisqu'on les a découverts sur des sites nord-américains datant de 84 à 66 millions d'années, donc du Crétacé supérieur. Ces grands tyrannosaures – *Albertosaurus*, *Gorgosaurus*, *Tarbosaurus* – ressemblent beaucoup à *T. rex* : des superprédateurs qui semblent avoir profité des derniers moments de l'histoire dinosaurienne pour prospérer. Bien que très impressionnants, ces nouveaux fossiles n'ont pas permis d'élucider les origines des tyrannosaures.

L'histoire évolutive des tyrannosaures n'a été éclairée que récemment, grâce aux fossiles mis au jour par des aventuriers de la paléontologie qui ont bravé le froid, la chaleur, les serpents, la poussière, pour explorer l'Ouest américain, l'Argentine, les déserts de Gobi et du Sahara, le Grand Nord russe…

L'un de ces aventuriers est mon collègue Alexander Averianov de l'Institut zoologique de l'Académie russe des sciences, à Saint-Pétersbourg. En 2010, son équipe annonce une découverte intéressante faite non loin de Krasnoïarsk, sur les vastes plateaux de la Sibérie centrale. L'amas d'ossements se révèle appartenir à un carnivore de stature comparable à celle d'un humain. Le terrain correspondant date d'environ 170 millions d'années, donc du Jurassique moyen, soit bien avant *T. rex*. Les chercheurs russes nomment leur trouvaille *Kileskus*, c'est-à-dire « lézard » en khakasse, la langue locale. Ce spécimen allait constituer un indice crucial.

Au premier abord, *Kileskus* n'est pas impressionnant et ne ressemble pas à *T. rex*. Si ce dernier avait vécu en Russie au Jurassique moyen, il aurait pu écraser *Kileskus* comme un moucheron. Cependant, *Kileskus* présente d'incontestables similitudes avec *Guanlong* *(voir l'arbre de parenté pages 80 et 81)*, un autre petit carnivore de Chine décrit en 2006 et postérieur de dix millions d'années à *Kileskus*. Par exemple, *Kileskus* et *Guanlong* ont en commun une crête osseuse sur la tête. Et *Guanlong*, connu par bien plus de spécimens complets que *Kileskus*, présente plusieurs traits tyrannosauriens, tels ces os nasaux fusionnés formant le museau.

Les traits communs à *Guanlong* et à *Kileskus* sont les signes d'une ascendance commune. Ces deux modestes formes, si peu dignes d'intérêt à première vue, constituent la souche ancestrale des tyrannosaures géants de la fin du Crétacé, tels *T. rex*.

Ces deux découvertes révèlent que, au contraire de ce que pensaient les paléontologues lors des premières découvertes de tyrannosaures, les plus anciens de ces dinosaures n'étaient pas des superprédateurs. Le groupe des tyrannosaures semble être issu d'une famille de carnassiers plutôt modestes dont les membres vivaient dans l'ombre de superprédateurs géants de leur époque, tels les allosaures et les cératosaures, qui ne leur étaient apparentés que de loin.

La découverte de *Kileskus* et de *Guanlong* nous révèle en outre que les tyrannosaures sont enracinés bien plus loin dans le temps qu'on ne l'aurait imaginé. *Kileskus* et *Guanlong* vivaient à l'époque où le supercontinent de la Pangée ne s'était pas encore totalement disloqué, de sorte que les lignées animales pouvaient se répandre sur les diverses masses continentales. Cette géographie disparue *(voir les cartes pages 80 et 81)* explique que l'on découvre les dinosaures les plus anciens en Russie ou en Chine, tandis que les espèces un peu plus tardives le sont en Amérique du Nord et au Royaume-Uni. Les espèces découvertes en Chine et en Russie prouvent aussi que des millions d'années ont été nécessaires avant que les tyrannosaures ne dominent. De fait, plus de 100 millions d'années se sont écoulées entre les premiers tyrannosaures et *T. rex*, soit bien plus que les 66 millions d'années qui séparent ce dernier de l'espèce humaine…

Kileskus est UN PETIT TYRANNOSAURE qui vécut il y a 170 millions d'années.

Que les tyrannosaures aient mis autant de temps avant d'atteindre leurs tailles gigantesques ne signifie pas que leur évolution a stagné. Nombre d'indices suggèrent que les tyrannosaures se sont beaucoup diversifiés bien avant l'apparition des *Tarbosaurus*, *T. rex* et leurs semblables. Des exemples frappants de cette prolifération ont été fournis par Liaoning, une région du nord-est de la Chine.

Le Liaoning, Pompéi du Crétacé

On ne peut pas dire que le Liaoning soit le plus bel endroit au monde. Bien que j'aie grandi dans les mornes plaines du Midwest américain, j'ai eu du mal à garder les yeux ouverts dans le train, voyage où j'ai vu défiler pendant trois heures et demie des paysages vallonnés drapés de brume et parsemés de fermes aux cheminées fumantes. Mais ces terres constituent un paradis pour les chasseurs de fossiles.

Depuis une vingtaine d'années, les fermiers de la région ont découvert des milliers de fossiles de dinosaures. Ces anciens animaux ont été ensevelis il y a 120 à 130 millions d'années par des émissions répétées de boue et de cendres volcaniques. Brusquement enfouis en milieu anaérobie, ils se sont conservés dans le moindre détail.

Parmi les fossiles mis au jour dans ce Pompéi du Crétacé, deux espèces de tyrannosaures retiennent l'attention. Mon collègue Xu Xuing, de l'Institut de paléontologie et de paléoanthropologie des vertébrés à Pékin, a fait connaître la première de ces espèces, *Dilong*, en 2004. À peu près de la taille d'un chien de race *golden retriever*, équipé de longs bras pour capturer ses proies, il est doté d'une ossature souple à longues jambes adaptée à la course.

La seconde espèce, décrite par Xu Xuing en 2012, est très différente. Long de 8 à 9 mètres et pesant environ une tonne, *Yutyrannus* occupait probablement le sommet de la chaîne alimentaire ou presque. Découverts dans la même formation rocheuse vieille de 125 millions d'années, ces deux tyrannosaures étaient sans doute contemporains. À elles deux, ces espèces caractérisées par des os nasaux fusionnés et d'autres traits tyrannosauriens caractéristiques démontrent qu'au Crétacé inférieur les tyrannosaures s'étaient déjà diversifiés en des formes, parfois de grande taille, adaptées aux diverses niches écologiques existantes.

La découverte de *Dilong* et de *Yutyrannus* est essentielle pour une autre raison encore. Il fut un temps où les paléontologues considéraient les dinosaures comme de gros reptiles patauds et écailleux ayant trop grandi. Or les indices recueillis au cours des vingt dernières années permettent d'affirmer que certains dinosaures étaient bien plus dynamiques et intelligents qu'on ne le pensait, et pas du tout écailleux puisqu'ils étaient… couverts de duvet ! *Dilong* et *Yutyrannus* font partie de ces dinosaures ressemblant davantage à des oiseaux qu'à des reptiles. Leur corps était couvert d'une épaisse couche de duvet, c'est-à-dire de ces plumes légères aux barbes non enchevêtrées qui tapissent le corps des oiseaux (particulièrement aquatiques) pour les protéger du froid. Comparables à des cheveux, qui seraient ramifiés, ces filaments

L'AUTEUR

Stephen BRUSATTE est paléontologue à l'université d'Édimbourg, en Écosse. Ses recherches se concentrent sur l'anatomie et l'évolution des dinosaures.

Un curieux dinosaure emplumé du Liaoning

Outre les tyrannosaures, les dinosaures prédateurs comprennent les dromaeosauridés ou « lézards coureurs ». [illegible], de l'Institut de géologie de l'Académie des sciences chinoises, viennent de décrire *Zhenyuanlong suni*, le [illegible] des plumes évoluées.

Les dromaeosauridés sont une famille de dinosaures théropodes (dinosaures carnivores dotés de pattes à quatre doigts) à plumes, ressemblant à des oiseaux. Ils sont apparus au milieu du Jurassique et ont disparu à la fin du Crétacé, ce qui indique un succès évolutif comparable à celui des tyrannosaures.

Découvert dans le district du Jianchang dans le Liaoning, dans une formation datant de 121 à 125 millions d'années, le nouveau dromaeosauridé mesurait quelque 65 centimètres de long. Son corps semble aberrant aux paléontologues, car il était doté de tout petits bras emplumés en [illegible] nous points comparables à ceux de *Microraptor*. De la taille d'un gros oiseau, *Microraptor*, pouvait probablement voler. Il semble en tout cas physiologiquement aussi proche des oiseaux que des autres théropodes. Il est muni de pennes sur les pattes et les ailes (bras ?), c'est-à-dire des plumes planaires qui, chez les oiseaux, ont la fonction de créer de la portance. *Zhenyuanlong suni* aussi est doté de pennes semblables, alors qu'il est peu vraisemblable qu'il ait pu voler, ni même planer étant donné sa taille et ses petits bras.

Les paléontologues invoquent plusieurs explications possibles du caractère aberrant de *Zhenyuanlong suni*. Ils se demandent d'abord si, après tout, il pouvait au moins un peu voler. Ils supputent qu'il aurait hérité ses « ailes » d'ancêtres qui, eux le pouvaient. Dans ce cas, il les aurait conservées, car des bras emplumés lui auraient été utiles pour parader… Une énigme évolutive de plus !

François Savatier

LA LONGUE ÉVOLUTION DES TYRANNOSAURIDÉS

Une série de nouveaux fossiles de tyrannosaures montre que le groupe des tyrannosauroïdes était très divers, et qu'il a mis très longtemps avant de produire des espèces géantes, comme *Tyrannosaurus rex*.

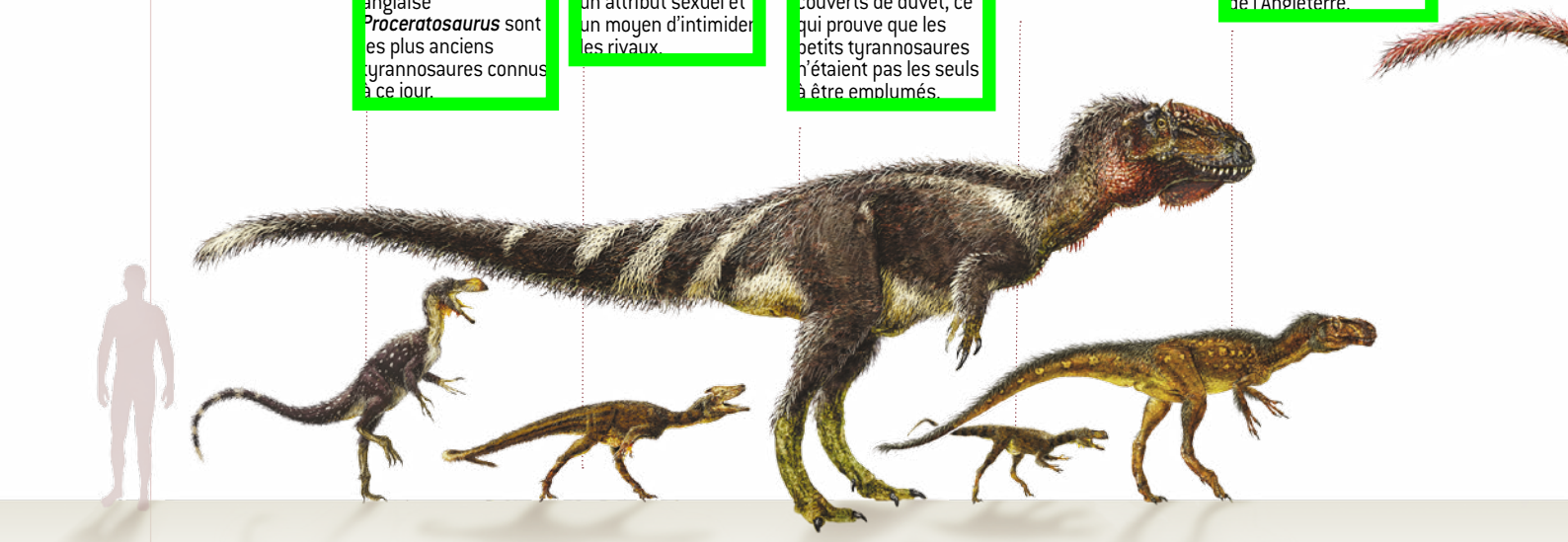
1 ***Kileskus*** Découverte en Sibérie centrale, cette espèce de taille humaine et l'espèce anglaise ***Proceratosaurus*** sont les plus anciens tyrannosaures connus à ce jour.

2 ***Guanlong*** Ce tyrannosaure chinois était doté d'une crête osseuse, peut-être un attribut sexuel et un moyen d'intimider les rivaux.

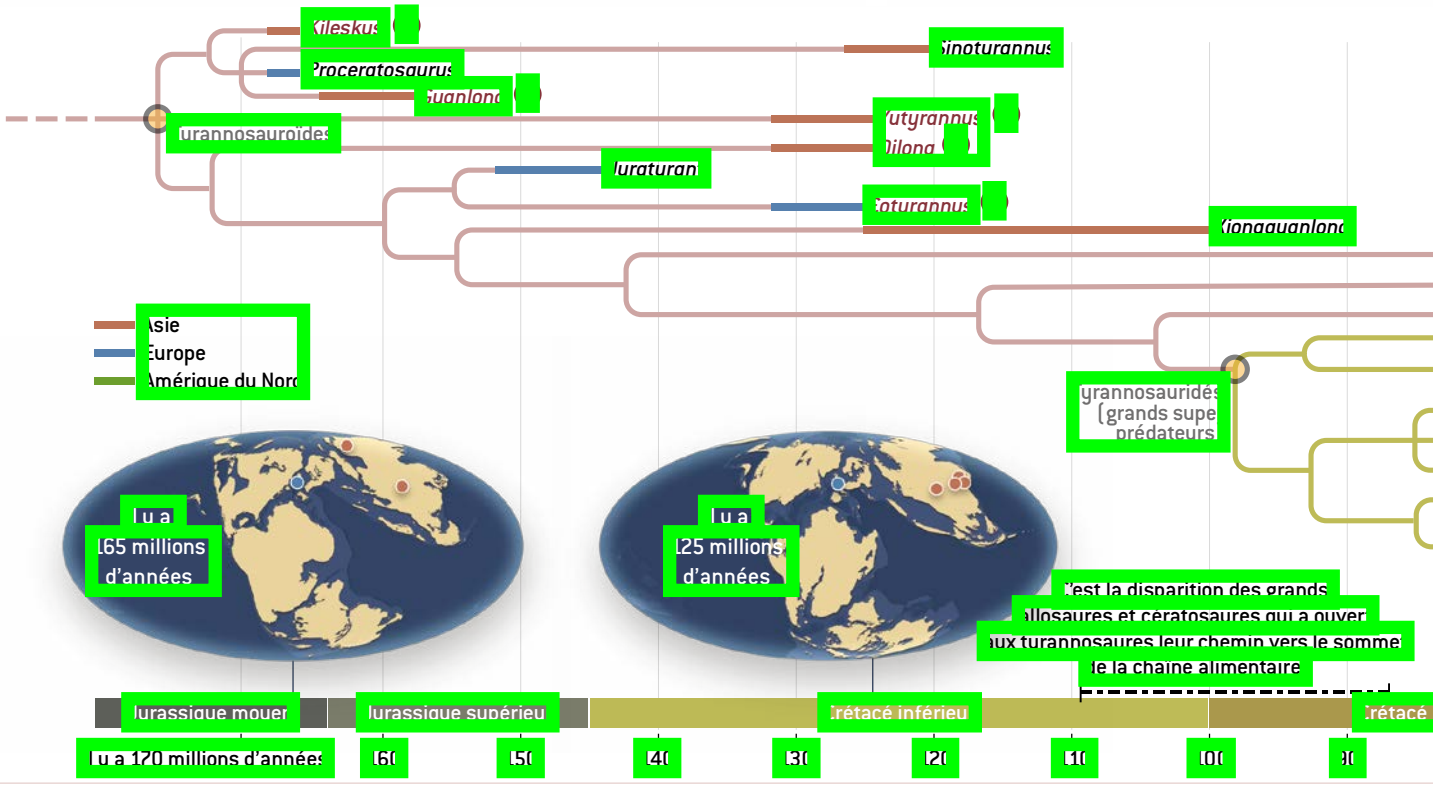
3 ***Yutyrannus*** Les fossiles de ce tyrannosaure chinois de grande taille étaient couverts de duvet, ce qui prouve que les petits tyrannosaures n'étaient pas les seuls à être emplumés.

4 ***Dilong*** La plus petite des espèces connues de tyrannosaures était bâtie pour la vitesse.

5 ***Eotyrannus*** Les fossiles de cette espèce à longs doigts proviennent de l'île de Wight, au sud de l'Angleterre.



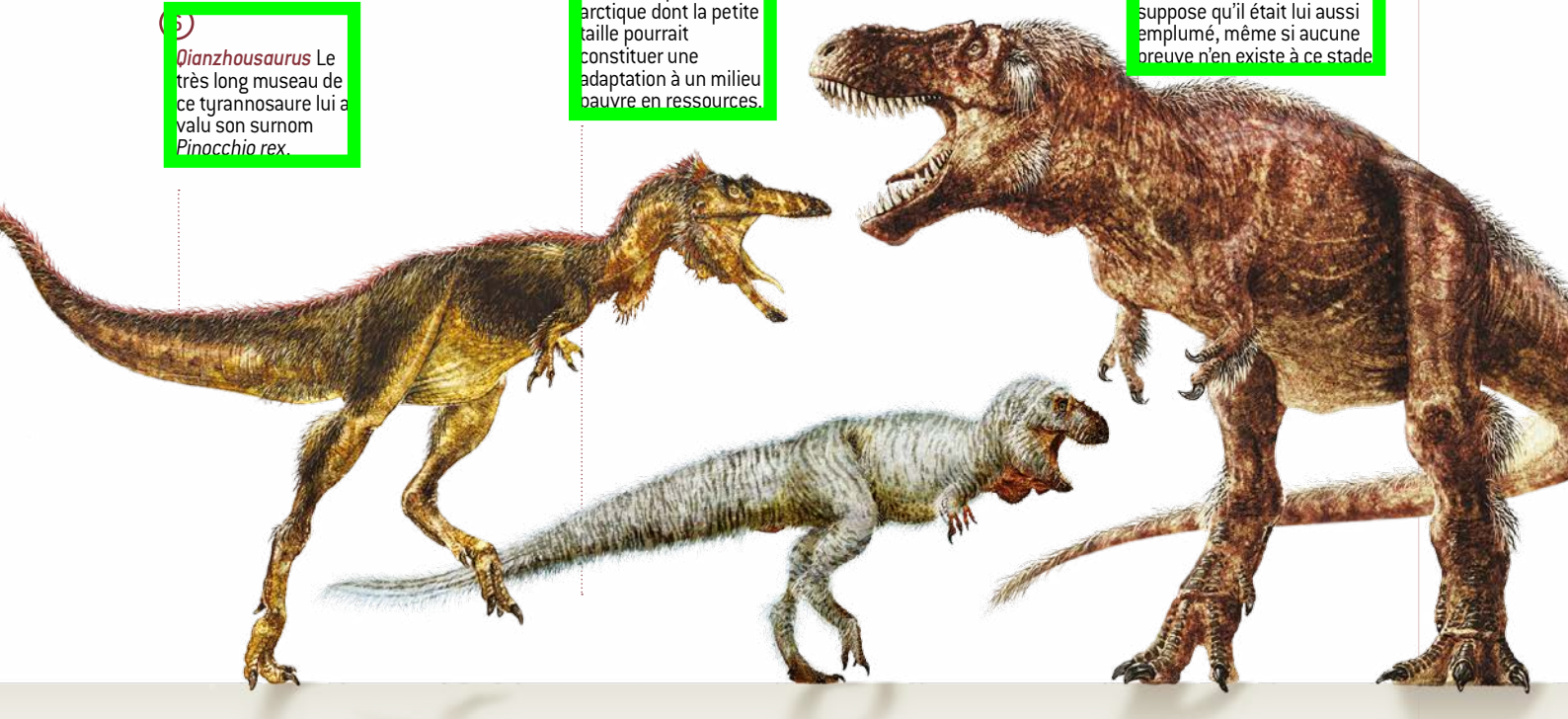
DE DEBUTS MODESTES...



6 *Qianzhousaurus* Le très long museau de ce tyrannosaure lui a valu son surnom *Pinocchio rex*.

7 *Nanuqsaurus* Le plus nordique des tyrannosaures connus est une espèce arctique dont la petite taille pourrait constituer une adaptation à un milieu pauvre en ressources.

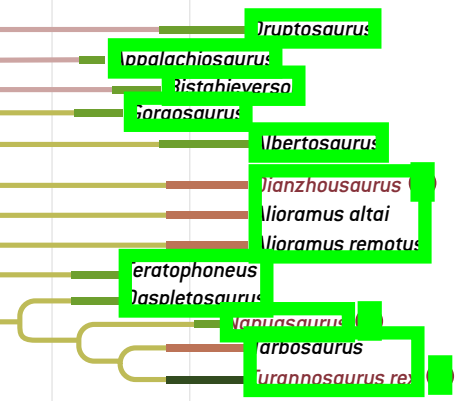
8 *Tyrannosaurus rex* Ce « roi des tyrans » fut l'un des plus grands prédateurs à avoir jamais foulé la terre. On suppose qu'il était lui aussi emplumé, même si aucune preuve n'en existe à ce stade.

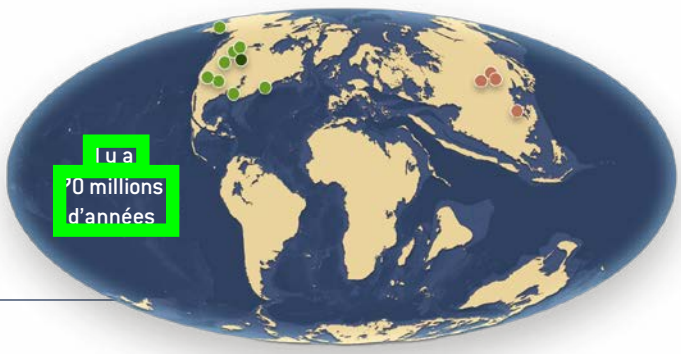


.. AU STATUT DE ROI DES ANIMAU)

LA BIOGEOGRAPHIE DES TYRANNOSAURES

Le registre fossile montre que le groupe des tyrannosaures a occupé un territoire bien plus grand qu'on ne le pensait. En effet, les paléontologues ont fait de nouvelles découvertes non seulement aux États-Unis, mais aussi en Chine, en Russie. Si les tyrannosaures ont pu autant se disperser, c'est parce que durant leur diversification, les masses continentales se touchaient encore.





constituaient pour les tyrannosaures (qui ne volaient pas !) à la fois une protection thermique et un ornement. La présence de plumes sur des tyrannosaures et sur beaucoup d'autres dinosaures suggère que le grand *T. rex* aussi était emplumé. Cela nous donne du pire des tyrans de la nature une curieuse nouvelle vision : celle d'une sorte de gigantesque oisillon, intelligent et énergique...

Une transition au milieu du Crétacé

Les découvertes réalisées en Russie, en Chine et ailleurs montrent que les tyrannosaures ont prospéré entre le Jurassique moyen (175,6 à 161,2 millions d'années) et le Crétacé inférieur (146 à 100 millions d'années). Ils n'étaient peut-être pas encore

QIANZHOUSAURUS, découvert sur un chantier chinois en 2010, était un tyrannosaure à long museau. Il partageait son habitat avec des tyrannosaures bien plus massifs, sans doute parce qu'il s'intéressait à de plus petites proies qu'eux, qu'il chassait en les coursant.

devenus des superprédateurs, mais ils constituaient un groupe de chasseurs furtifs et rapides, bien établis au sein de niches écologiques stables.

Mais entre 85 et 110 millions d'années, au beau milieu du Crétacé, les conditions ont changé. L'écosystème des dinosaures s'est radicalement restructuré, ce qui s'est notamment traduit par la disparition presque complète des allosaures et des cératosaures. Bien que ces grands prédateurs aient très longtemps occupé le sommet de la pyramide alimentaire, ils ont été remplacés par les tyrannosaures, devenus les superprédateurs de tous les continents septentrionaux.

Les raisons exactes de ce grand changement n'ont pas été élucidées, pour une raison simple : le Crétacé moyen ne nous a légué que très peu de fossiles. Il est possible que l'augmentation de la température terrestre moyenne et les fluctuations du niveau marin qui se sont produites il y a 94 millions d'années soient en cause.

Quoi qu'il en soit, les tyrannosaures ont prospéré lorsqu'ils ont atteint le sommet de la chaîne alimentaire. Au cours des derniers 20 millions d'années du Crétacé, ils ont régné en maîtres en Amérique du Nord et en Asie, où ils sont devenus d'étranges superprédateurs pesant des tonnes, dotés de petits bras et d'un crâne imposant. Ils mordaient si violemment leurs proies qu'ils leur brisaient souvent les os. Jeunes, ils devaient croître vite pour survivre, de sorte qu'ils prenaient plusieurs kilogrammes par jour. Pour autant, leur vie était si rude que les paléontologues n'ont toujours pas découvert de spécimen âgé de plus d'une trentaine d'années.

Curieusement, quelle qu'ait été leur domination en Amérique du Nord et en Asie, ces colosses ne semblent pas s'être implantés en Europe ou sur les continents du sud, où vivaient d'autres groupes de grands prédateurs. Cela s'expliquerait par le climat et par la configuration des continents au Crétacé supérieur. La planète était devenue à cette époque très différente de celle où les premiers tyrannosaures avaient vécu. Continuant à se désolidariser les uns des autres, les continents avaient atteint des positions proches de celles qu'ils occupent aujourd'hui. La montée du niveau des océans avait coupé l'Amérique du Nord en deux et réduit l'Europe à un vaste archipel de petites îles. La surface de la Terre aux temps des *T. rex* était donc très fragmentée. Les superprédateurs d'une région donnée ne pouvaient pas en conquérir une autre, car ils ne pouvaient y accéder !

On pourrait s'attendre à ce que les tyrannosaures aient éliminé leurs concurrents plus petits. Or c'est le contraire qui semble vrai, puisque le registre fossile révèle l'existence d'une grande diversité de tyrannosaures occupant des positions variées tout au long de la chaîne alimentaire. Cette situation semble avoir persisté jusqu'à la fin du Crétacé.

Qianzhousaurus, le tyrannosaure au nez de Pinocchio mis au jour à Ganzhou, en est le parfait exemple. En 2013, lors d'un congrès, mon collègue Junchang Lü, de l'Institut de géologie de l'Académie chinoise des sciences, m'a montré des photographies

du spécimen. J'en suis resté bouche bée : ce que je voyais était un tyrannosaure de l'extrême fin du Crétacé, mais il était très différent de *T. rex*. Mesurant entre 8 et 9 mètres de long, donc nettement plus petit, il ne pesait vraisemblablement qu'une tonne. Contrairement à celui de *T. rex*, armé d'une mâchoire apte à broyer tout adversaire, son crâne était long et délicatement constitué.

Junchang Lü m'a invité à l'aider à décrire la nouvelle espèce, car j'avais déjà étudié de près deux tyrannosaures à long museau découverts il y a environ 40 et 10 ans. Ces dinosaures avaient alors plongé les paléontologues dans une grande perplexité. La première de ces formes, *Alioramus remotus*, a d'abord été connue par un squelette incomplet qu'une équipe russe mit au jour en Mongolie dans les années 1970. Ces chercheurs avaient souligné son aspect anormal. Comme, au cours de la guerre froide, peu de paléontologues ont eu la possibilité de l'étudier, on a continué à se demander s'il s'agissait d'une nouvelle espèce atypique ou d'un jeune représentant de l'espèce *Tarbosaurus*, déjà connue.

Plusieurs tyrannosaures à long museau

Cette incertitude dura jusqu'au début des années 2000, quand une équipe américano-mongole dirigée par mon directeur de thèse, Mark Norell, du Muséum américain d'histoire naturelle, découvrit un spécimen d'*Alioramus* bien plus complet et mieux conservé. Mark Norell me demanda alors de l'étudier. C'est ainsi qu'en 2009 nous proposions une nouvelle espèce : *Alioramus altai*. Ce fossile semblait distinct de *Tarbosaurus* ; toutefois, comme le squelette dont nous disposions était celui d'un individu juvénile (ce que révélait la structure interne des os), on ne pouvait exclure que ses traits particuliers soient la conséquence d'une croissance incomplète.

Une fois n'est pas coutume, cette question paléontologique a été tranchée seulement quelques années plus tard, grâce à la découverte fortuite de 2010, à Ganzhou. Le squelette de *Qianzhousaurus* mis au jour avait en effet le même long museau, la même constitution délicate et la même petite taille qu'*Alioramus*, mais il était clair qu'il appartenait à un individu beaucoup plus âgé. Cela nous permit de conclure que les tyrannosaures à long museau constituaient à la toute fin du Crétacé un groupe asiatique occupant une position intermédiaire dans la chaîne alimentaire par rapport à celle de *Tarbosaurus* et de ses semblables.

Qianzhousaurus n'était pas le seul petit tyrannosaure cohabitant avec les poids lourds de son groupe. Deux mois environ avant la publication de notre description de *Qianzhousaurus*, mes collègues Anthony Fiorillo et Ronald Tykoski, du muséum Perot à Dallas, ont découvert près du cercle polaire un tyrannosaure de la fin du Crétacé encore plus étrange : *Nanuqsaurus*. Il ne reste de lui que quelques ossements similaires à ceux de *T. rex*, mais deux fois plus petits. Les os comportant des sutures épaissies qui ne s'observent que chez des adultes, Anthony Fiorillo et Ronald Tykoski ont supposé que la pauvreté en ressources du milieu polaire a entraîné une tendance au nanisme, tout comme de nombreux animaux insulaires sont plus petits que leurs congénères continentaux. L'idée est donc que les *T. rex* monstrueux du sud avaient des cousins de taille réduite dans le Grand Nord.

Les nouveaux fossiles de tyrannosaures nous ont beaucoup appris sur l'évolution de leur groupe. Plusieurs questions essentielles demeurent cependant. Quelle est l'origine des tyrannosaures ? Est-elle antérieure au Jurassique moyen ? Date-t-elle du Jurassique inférieur, période pour laquelle nous avons très peu de fossiles ? Des tyrannosaures ont-ils vécu sur les continents de l'hémisphère Sud entre le Jurassique moyen et le Crétacé moyen ?

La plupart des nouveaux fossiles tyrannosauriens ont été retrouvés dans l'hémisphère Nord. Or nous savons qu'au Jurassique et Crétacé moyens de nombreux groupes de dinosaures avaient une répartition planétaire… Des inconnues subsistent aussi quant à la biologie des tyrannosaures : de quelles sortes de plumes *T. rex* était-il recouvert et à quoi servaient-elles ? À quoi servait le long museau de *Qianzhousaurus* et *Alioramus* ?

Bien que très incomplète, l'histoire des tyrannosaures montre une fois de plus que l'évolution est imprévisible. Personne n'aurait pensé que, en 170 millions d'années, on passerait d'animaux chétifs à de féroces géants dominant les chaînes alimentaires de plusieurs continents, ni que, il y a 66 millions d'années, l'impact d'une météorite mettrait brutalement un terme à leur règne.

T. rex, charognard ou chasseur ?

Tyrannosaurus rex était chasseur : on a retrouvé une de ses dents fichée dans la vertèbre d'un autre dinosaure. Ses mâchoires pouvaient exercer des forces de 20 tonnes. Mais il ne courait pas vite, et, comme la taille de ses bulbes olfactifs suggère qu'il avait un odorat développé pouvant lui permettre de repérer une carcasse à des kilomètres, certains paléontologues proposent que _T. rex_ était un charognard. Alors, charognard ou chasseur ? Les deux, sans doute !

BIBLIOGRAPHIE

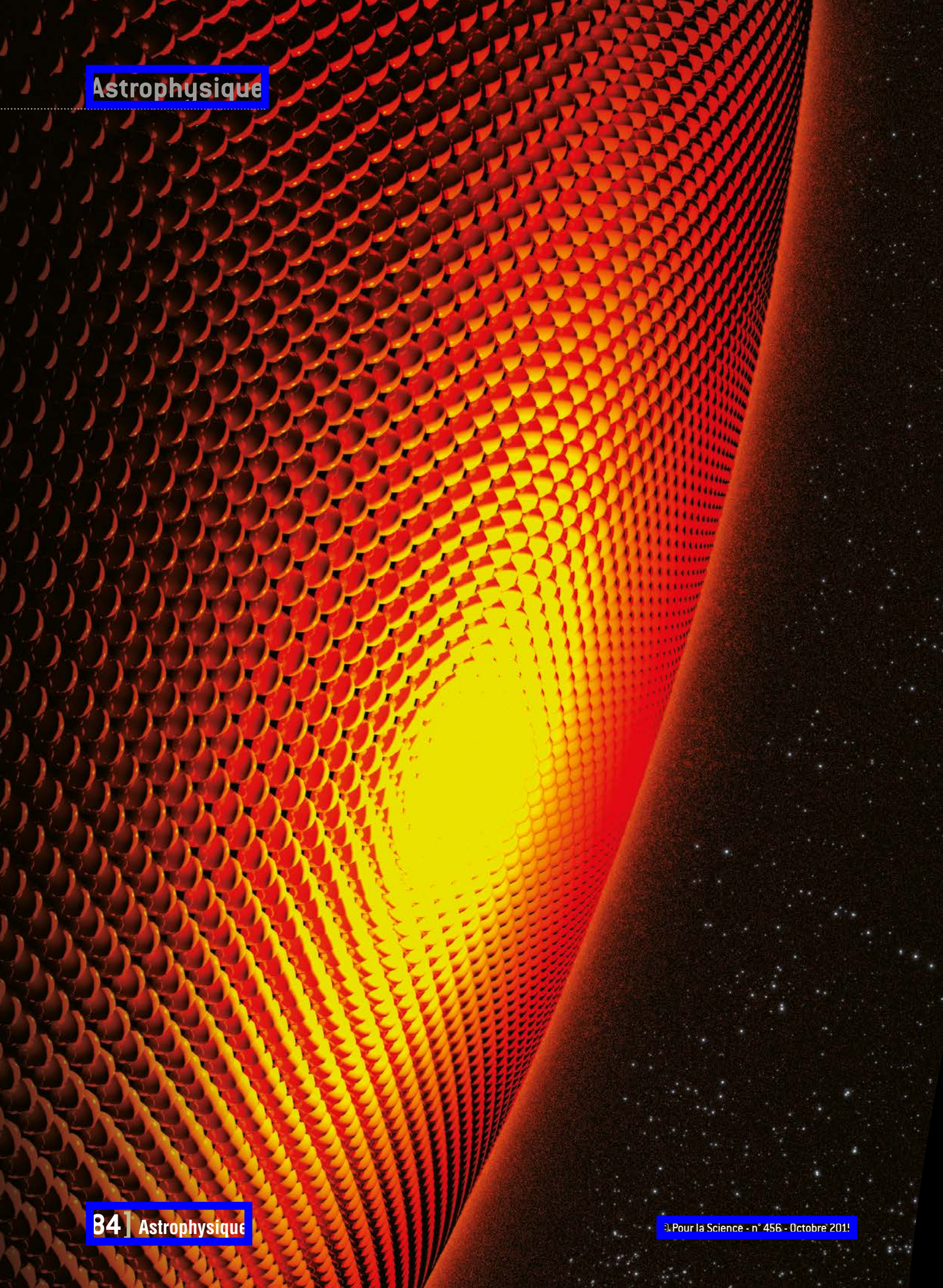
J. Lü *et al.*, **A new clade of Asian late Cretaceous long-snouted tyrannosaurids**, *Nature Communications*, vol. 5, article 3789B, 2014.

A. R. Fiorillo et R. S. Tykoski, **A diminutive new Tyrannosaur from the top of the world**, *PLoS One*, vol. 9(3), article e91287, 2014.

S. Brusatte *et al.*, **New research on ancient exemplar organisms**, *Science*, vol. 329, pp. 1481-1485, 2010.

M. Schweitzer, **Dinosaures : on a retrouvé leur sang**, *Pour la Science* n°402, avril 2011.

G. M. Erickson, **La vie de _Tyrannosaurus rex_**, *Dossier Pour la Science*, n° 48, 2005.



L'horizon des trous noirs brûle-t-il ?

Pour concilier la relativité générale et la physique quantique des trous noirs, certains physiciens ont conclu que l'horizon des événements entourant un tel astre est un « mur de feu » rempli de particules de haute énergie.

Joseph Polchinsk

L'ESSENTIEL

- L'évaporation des trous noirs implique que l'information qui y entre est perdue, ce que la physique quantique interdit.
- Les solutions à cette difficulté, inspirées de la théorie des cordes, posent d'autres problèmes.
- L'auteur et ses collègues proposent un scénario radical, où le trou noir serait entouré de particules de haute énergie, un « mur de feu ».
- Résoudre le paradoxe de l'horizon ouvrirait la voie à une unification de la physique quantique et de la relativité générale

Tomber dans un trou noir n'est certainement pas une partie de plaisir. Dès que les physiciens ont compris que les trous noirs existaient, ils ont su qu'en approcher trop exposait à une disparition certaine. En revanche, dans le cas d'un grand trou noir, ils pensaient qu'un astronaute ne ressentirait rien de spécial lorsqu'il franchit le point de non-retour, nommé l'horizon des événements. D'après la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein, cette région ne revêt aucun caractère particulier. Tout voyageur qui traverserait l'horizon aurait juste la sensation de tomber indéfiniment dans un puits d'une indicible noirceur, sans se rendre compte qu'il n'a plus aucune chance d'en sortir.

Récemment, mes collègues et moi avons brossé un tableau bien différent de l'horizon des événements. À la lumière des derniers développements en matière de physique quantique à proximité d'un trou noir, il semble désormais que notre astronaute aurait une tout autre expérience que celle prévue par la théorie d'Einstein. Au lieu d'une traversée de l'horizon des événements sans phénomène particulier, l'astronaute rencontrerait un mur de particules de haute énergie, ou « mur de feu » (le terme utilisé en anglais est *firewall*, qui correspond aussi à « pare-feu »), qui lui serait instantanément fatal. Ce mur pourrait même marquer la fin de l'espace.

Il y a trois ans, notre groupe de l'université de Californie à Santa Barbara – Donald Marolf, Ahmed Almheiri, James Sully et moi-même (aujourd'hui connus sous l'acronyme AMPS) – est parvenu à cette conclusion après avoir étudié certaines idées de la théorie des cordes appliquées à la physique des trous noirs, en particulier en considérant un débat ouvert dès les années 1970 par Stephen Hawking. Ce physicien britannique avait identifié un conflit profond entre les prévisions de la théorie quantique et celles de la relativité générale dans ces environnements extrêmes. Selon son raisonnement, il existe une faille soit dans la physique quantique, soit dans la représentation de l'espace-temps donnée par la relativité générale d'Einstein. Depuis, le débat oscille entre l'une et l'autre hypothèse.

Si notre proposition de mur de feu a été accueillie avec un certain scepticisme,

comme ce fut aussi le cas pour le résultat de Stephen Hawking, aucune alternative satisfaisante n'a encore émergé. En supposant que la physique quantique est correcte, le mur de feu en est une conséquence directe, bien que son existence soulève d'autres difficultés théoriques. Il semble que les physiciens doivent abandonner l'une de leurs théories fétiches, mais nous ne savons pas encore laquelle. Nous espérons cependant qu'une compréhension plus profonde de la physique quantique et de la relativité naîtra de cette confusion et, avec de la chance, qu'un moyen de résoudre les contradictions apparentes entre ces deux théories reines de la physique émergera.

Pour bien comprendre le problème, il faut partir de la notion de trou noir. Cet objet est une prévision de la relativité générale, la théorie de la gravitation. Dans ce cadre, la matière, ou plus généralement l'énergie, déforme l'espace-temps. Pour le cas le plus extrême, celui du trou noir, si la masse présente est suffisamment importante, la force gravitationnelle entraîne son effondrement en un point, nommé singularité du trou noir. À cet endroit, certaines quantités décrivant le champ gravitationnel deviennent infinies.

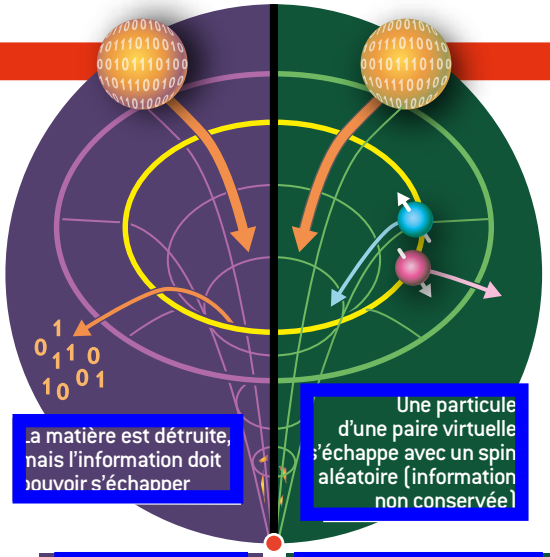
Autour de cette singularité, on définit l'horizon des événements comme la limite où le champ gravitationnel est si fort que même une particule se déplaçant à la vitesse de la lumière ne peut en sortir. Un voyageur spatial qui franchirait cette frontière serait alors dans l'impossibilité d'échapper à l'attraction gravitationnelle du trou noir. Cependant, pour un trou noir très massif, l'augmentation du champ gravitationnel est si progressive au niveau de l'horizon que l'astronaute ne se douterait de rien en le traversant. En vertu du principe d'équivalence de la relativité générale, l'horizon des événements est une région sans caractère

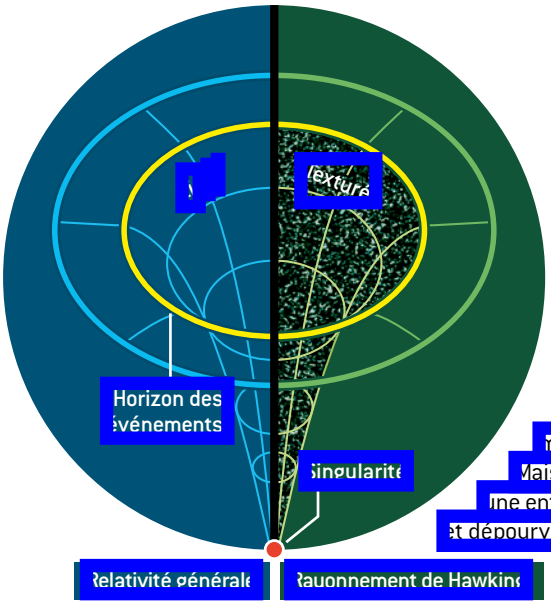
L'AUTEUR

Joseph POLCHINSKI est professeur de physique à l'université de Californie à Santa Barbara, et membre permanent de l'institut Kavli de physique théorique.

LES ENIGMES DE L'HORIZON DES TROUS NOIRS

EN 1974, STEPHEN HAWKING a montré de façon théorique qu'un trou noir émet un faible rayonnement. D'après la physique quantique, partout dans l'Univers et en permanence, des paires particule-antiparticule surgissent du vide et s'annihilent aussitôt ou presque. Stephen Hawking a remarqué que, si une telle « paire virtuelle » émerge du vide près de l'horizon d'un trou noir, l'une des deux particules tombe dans l'astre tandis que l'autre s'échappe, constituant le « rayonnement de Hawking ». Ce phénomène conduit à des difficultés portant sur les liens entre la relativité générale et la physique quantique.





Le problème de l'entropie

Le spectre du rayonnement de Hawking suggère que l'on peut attribuer une température à tout trou noir. En principe, la température d'un objet est liée aux mouvements de ses atomes. L'existence d'une température pour un trou noir implique que ce dernier a une sous-structure, des sortes d'éléments constituants internes. Ceux-ci peuvent s'organiser selon diverses configurations équivalentes, ce qui confère au trou noir une « entropie », une mesure du désordre reflété par le nombre de combinaisons possibles. Mais la théorie de la relativité générale interdit aux trous noirs d'avoir une entropie : d'après cette théorie, un trou noir est entièrement lisse et dépourvu de structure interne.

particulier. En revanche, plus près de la singularité, le champ gravitationnel s'intensifie rapidement au point que des forces de marées finiront par étirer et déchiqueter le corps de l'astronaute.

Pour en revenir à l'aspect anodin de l'horizon des événements, les physiciens aiment souligner que le Système solaire tout entier pourrait tomber en ce moment même dans un trou noir géant sans que nous ne ressentions rien qui sorte de l'ordinaire.

En 1974, Stephen Hawking chamboula la vision classique des trous noirs en considérant certaines prévisions de la physique quantique qu'il appliqua au voisinage de l'horizon des trous noirs. Selon cette théorie, partout dans l'Univers et en permanence, des paires constituées d'une particule et de son homologue d'antimatière se forment spontanément pour disparaître aussitôt. Si de telles fluctuations se produisent juste à l'extérieur de l'horizon du trou noir, Stephen Hawking a montré que la paire pouvait être séparée. L'une des particules tombe alors dans le trou noir, tandis que l'autre s'échappe. Un observateur situé loin du trou noir ne voit que les particules qui s'échappent ; l'astre semble émettre des particules, donc perdre de sa masse. À terme, le trou noir tout entier se viderait de sa substance par cette « évaporation ».

Les trous noirs s'évaporent

Pour les trous noirs observés par les astrophysiciens, l'évaporation n'est pas un problème, car ces astres acquièrent de la masse sous forme de gaz et de poussière beaucoup plus rapidement qu'ils n'en perdent par le rayonnement de Hawking *(voir la figure page 89)*. Mais à des fins théoriques, on peut étudier ce qui se passerait si un trou noir était complètement isolé et si nous avions assez de temps pour assister au processus d'évaporation. En se livrant à une telle expérience de pensée, Stephen Hawking a découvert deux contradictions entre la relativité générale et la physique quantique.

Le premier conflit concerne la température du trou noir. Le spectre lumineux du rayonnement de Hawking pour un trou noir isolé est identique à celui émis par un objet chauffé (le rayonnement dit de corps noir). Il s'ensuit que l'on peut attribuer une température au trou noir. Comme la température d'un objet résulte de l'agitation de ses composants microscopiques, on en déduit qu'un trou noir aurait une structure microscopique constituée d'éléments discrets (non continus).

En 1972, le physicien Jacob Bekenstein, maintenant à l'université hébraïque de Jérusalem, était déjà arrivé à cette conclusion en se livrant à des expériences de pensée consistant à jeter des objets

Le paradoxe de l'information

Selon les principes de la physique quantique, l'information ne peut pas être détruite. Cependant, cela pourrait être le cas dans un trou noir. Cet objet s'évapore par rayonnement de Hawking, mais les propriétés des particules qui s'échappent n'ont aucun lien avec l'information portée par la matière qui est tombée dans le trou noir. L'information est donc perdue. Stephen Hawking suggérait qu'il faudrait modifier la mécanique quantique afin d'autoriser une telle perte d'information.

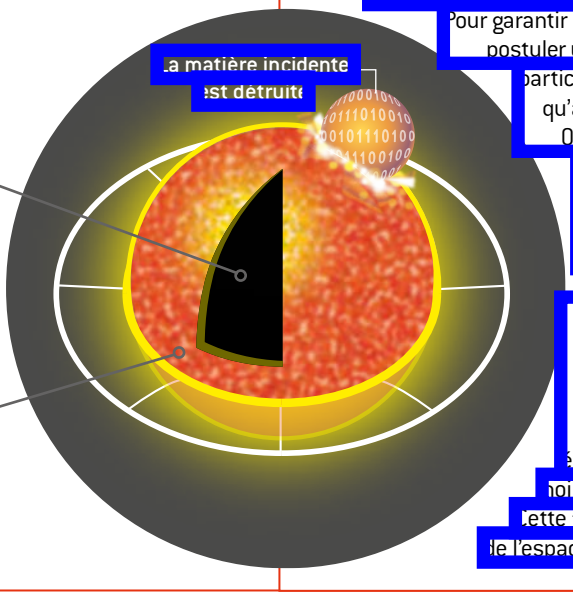
DES PISTES EN THÉORIE DES CORDES

Les premières avancées...

Pour résoudre ces énigmes, les physiciens ont tenté d'unifier la relativité générale et la physique quantique en une théorie cohérente qui parviendrait à décrire les trous noirs. Une piste, la théorie des cordes, postule que les particules sont de minuscules cordes vibrantes. Cette théorie semblait résoudre certains aspects du paradoxe de l'information et du problème de l'entropie.

... présentent des difficultés...

Pour garantir la conservation de l'information, il faut postuler un lien quantique, l'intrication, entre les particules de chaque paire virtuelle, ainsi qu'avec le rayonnement de Hawking. Or la mécanique quantique interdit qu'une particule soit intriquée avec deux systèmes différents, ce que sont pourtant sa partenaire de la paire et le rayonnement de Hawking.

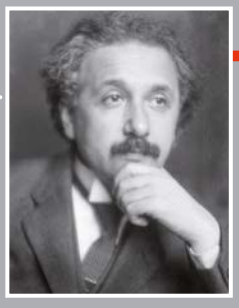


... qui ont conduit aux murs de feu

Pour résoudre ce problème, on peut supposer que l'intrication de la paire virtuelle est brisée. Il s'ensuit une libération de particules de haute énergie au niveau de l'horizon du trou noir, ce qui forme un mur de feu. Cette frontière pourrait marquer la fin de l'espace-temps.

Du trou noir ...

1915
Albert Einstein élabore la théorie de la relativité générale



1916
Karl Schwarzschild trouve la première solution exacte des équations d'Einstein, préfigurant ce que l'on nommera un trou noir.

1971
On identifie pour la première fois un trou noir, dans le sustème binaire Cygnus X-1.

dans un trou noir. À partir de ces idées, il détermina, avec Stephen Hawking, une formule donnant l'entropie d'un trou noir, liée au nombre d'éléments qu'il contient. L'entropie est une mesure du désordre, qui augmente avec le nombre d'états ou configurations microscopiques que le système peut avoir. Plus le trou noir contient d'éléments, plus il y a de configurations possibles, et plus l'entropie est grande. Selon la formule trouvée par les deux physiciens, l'entropie d'un trou noir est proportionnelle à l'aire de l'horizon des événements.

Cette température du trou noir et l'existence d'éléments discrets sont en contradiction avec la relativité générale, qui stipule que les trous noirs ont une géométrie lisse et sans structure. Dans la théorie d'Einstein, ces astres sont caractérisés uniquement par leur masse, leur moment cinétique (leur rotation) et leur charge électrique: pour reprendre l'image de John Wheeler, physicien à l'université de Princeton, « les trous noirs n'ont pas de cheveux ». En considérant les effets de la physique quantique à proximité de l'horizon du trou noir, ce dernier acquiert des « cheveux ».

Le rayonnement de Hawking défie aussi les principes de la physique quantique. Selon les calculs de Stephen Hawking, les propriétés des particules qui s'échappent d'un trou noir ne dépendent pas des caractéristiques de la matière qui lui a donné naissance (en général une étoile massive qui s'est effondrée). Cela signifie que toute l'information que contenait la matière avant la formation du trou noir est définitivement perdue. Par exemple, si nous envoyons dans le trou noir une lettre comportant un message, il n'y a aucun moyen de reconstituer ce dernier à partir des particules qui finissent par émerger du trou noir. Une fois que le message a franchi l'horizon, son information est piégée à l'intérieur du trou noir et n'a aucune incidence sur le rayonnement qui est émis par l'astre. Plus grave, comme le trou noir finit par s'évaporer complètement, l'information disparaît totalement.

Or, en physique quantique, la perte d'information est interdite. Tout système est décrit par un objet mathématique, la fonction d'onde, qui spécifie l'état du système. Cette fonction peut se transformer, mais il est toujours possible de retrouver

La perte d'information est interdite dans le cadre de la physique quantique, mais semble se produire dans les trous noirs

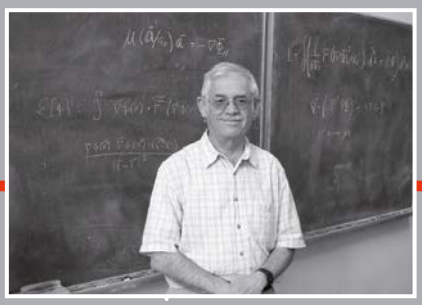
les conditions initiales, car l'information est conservée. Dans l'expérience de pensée de Stephen Hawking, la perte d'information signifie que nous n'avons aucun moyen de prédire la fonction d'onde du rayonnement de Hawking à partir des propriétés de la matière que le trou noir a engloutie. Stephen Hawking en a conclu que les lois de la physique quantique devaient être modifiées pour autoriser la perte d'information dans les trous noirs.

Le problème est bien plus fondamental qu'il n'y paraît. Comparons cette situation avec ce qui se produit si nous brûlons le message. En pratique, nous ne savons pas reconstituer et le message est perdu, mais pas du point de vue de la physique quantique. Comme le processus de combustion est décrit par la physique quantique, la fonction d'onde de la fumée dépend du message de départ. En théorie donc, si nous étions capables de collecter toute l'information quantique de la fumée, nous pourrions reconstituer le message. Pour les trous noirs, la fonction d'onde du rayonnement de Hawking n'a aucun lien avec le message entrant, la perte d'information est définitive.

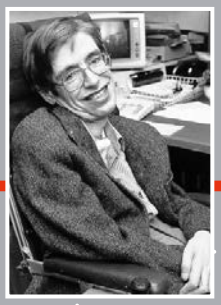
Certains physiciens ont argumenté que, si Stephen Hawking a raison et que l'information peut être détruite, alors cela devrait se produire non seulement dans la situation exotique de l'évaporation du trou noir, mais partout et tout le temps car, en physique quantique, tout ce qui n'est pas interdit arrive. Nous en verrions les signes dans la physique du quotidien, y compris probablement des violations importantes de la loi de conservation de l'énergie. L'argument de Stephen Hawking résiste pourtant à ces objections en soulignant le rôle essentiel de l'horizon des événements, spécifique aux trous noirs et absent dans le cas de la combustion du papier.

Il semble ainsi que nous soyons confrontés à un dilemme pour résoudre ce conflit. Il faut soit modifier la physique quantique pour autoriser une perte d'information, soit modifier la relativité générale pour permettre à l'information de s'échapper de l'intérieur d'un trou noir.

Une autre piste serait que le trou noir ne s'évapore pas complètement, mais



1972
Jacob Bekenstein développe le concept d'entropie d'un trou noir



1974
Le théoricien Stephen Hawking découvre l'évaporation d'un trou noir

1976
D'après Stephen Hawking, l'information qui entre dans un trou noir est définitivement perdue.

qu'il en reste un vestige microscopique contenant toute l'information de l'étoile à partir de laquelle il s'est créé. Mais cette « solution » présente ses propres difficultés. Un objet aussi petit contenant autant d'information n'est pas compatible avec la formule de l'entropie énoncée par Jacob Bekenstein et Stephen Hawking.

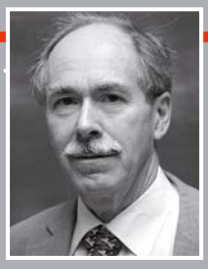
Une voie alternative est celle de la théorie des cordes. Des physiciens l'ont élaborée pour concilier la relativité générale et la physique quantique et obtenir une théorie quantique de la gravitation. Dans ce cadre, les particules élémentaires ponctuelles du modèle standard sont remplacées par de microscopiques cordes vibrantes. Cette approche parvient à éliminer certaines des difficultés mathématiques qui surgissent quand on tente de combiner la physique quantique et la relativité générale. Aucune confirmation expérimentale ne permet aujourd'hui de la valider, mais la théorie des cordes a été très fructueuse pour traiter les divers problèmes rencontrés sur l'horizon des trous noirs.

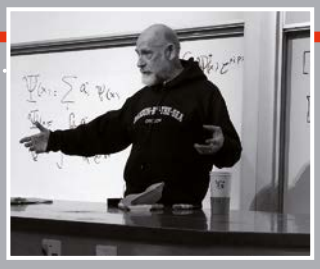
Calculer l'entropie avec des cordes

En 1995, je travaillais sur une expérience de pensée avec des cordes dans des espaces confinés. En poursuivant des travaux réalisés quelques années plus tôt avec des collègues, j'ai montré que la théorie des cordes telle que nous la comprenions alors n'était pas complète. Elle imposait en fait l'existence d'autres objets que les cordes unidimensionnelles : des objets nommés D-branes ayant plusieurs dimensions, voire plus que les trois d'espace et celle de temps qui nous sont familières. La théorie des cordes, elle-même, nécessite de supposer que l'Univers comporte 9 ou 10 dimensions d'espace. Les dimensions supplémentaires sont enroulées sur elles-mêmes de sorte qu'elles échappent à nos sens (de façon similaire, un câble électrique semble unidimensionnel de loin, son épaisseur n'étant perceptible que si l'on s'en approche). Les D-branes seraient enroulées dans ces dimensions supplémentaires. L'année suivante, Andrew Strominger et Cumrun Vafa, tous deux aujourd'hui à l'université Harvard, ont montré que les cordes et les D-branes fournissent le nombre précis de briques

CE TROU NOIR SUPERMASSIF *(vue d'artiste)* absorbe de la matière, contrairement au trou noir théorique considéré par les physiciens qui étudient le mur de feu. Ici, un disque d'accrétion s'est formé autour du trou noir : la matière qu'il contient s'échauffe par frottement et rayonne.

1990-1993
Gerard 't Hooft et Leonard Susskind postulent le principe de « complémentarité des trous noirs »





1995
Joseph Polchinski développe l'idée de D-branes en théorie des cordes.

1996
Le problème de l'entropie d'un trou noir est résolu par Andrew Strominger et Cumrun Vafa.

de base requises pour rendre compte de l'entropie du trou noir, au moins pour certains trous noirs très symétriques. L'énigme de l'entropie était en voie de résolution.

La question suivante concernait la perte d'information. En 1997, Juan Maldacena, actuellement à l'Institut d'études avancées de Princeton, dans le New Jersey, a proposé un moyen de contourner le problème de la perte d'information, solution parfois nommée dualité de Maldacena (ou correspondance AdS/CFT). Une dualité est une équivalence entre deux choses en apparence très différentes. La dualité de Maldacena montre que les mathématiques d'une théorie combinant la physique quantique et la gravitation (une théorie quantique de la gravitation), et fondée sur la théorie des cordes, sont équivalentes aux mathématiques d'une théorie quantique ordinaire, sans gravitation, mais dans un jeu de conditions particulières. Par exemple, la physique quantique d'un trou noir est équivalente à celle d'un gaz chaud de particules nucléaires.

La conséquence de la dualité de Maldacena est que l'une des deux façons d'aborder le problème du trou noir ne repose que sur les lois de la physique quantique (sans relativité générale et sans horizon), où l'information ne peut pas être perdue. Le trou noir doit donc préserver l'information. Et comme les trous noirs ne laissent pas de vestiges en s'évaporant, l'information doit ressortir avec le rayonnement de Hawking.

Un aspect étonnant de la dualité est que le scénario sans gravité opère dans un espace ayant une dimension de moins que dans l'autre scénario. Cela signifie que ce que nous nommons l'espace-temps pourrait être différent de ce que nous percevons ; il faudrait le comprendre davantage comme un hologramme tridimensionnel projeté depuis la surface bidimensionnelle plus fondamentale d'une sphère.

Juan Maldacena a découvert la dualité qui porte son nom en s'attaquant précisément aux questions d'entropie et de perte d'information dans le trou noir. C'est sans doute avec la dualité de Maldacena que nous nous sommes rapprochés le plus d'une unification de la relativité générale et de la physique quantique. Toutefois, il reste à prouver que cette conjecture est vraie même si elle est étayée par de nombreux indices. L'idée a d'ailleurs convaincu Stephen Hawking qui a annoncé, en 2004, qu'il avait changé d'avis concernant la perte d'information dans les trous noirs. Cependant, la dualité de Maldacena n'explique pas clairement comment l'information passerait de l'intérieur à l'extérieur du trou noir.

L'information n'est pas perdue dans le trou noir

Revenons une vingtaine d'années plus tôt, à l'époque où les physiciens essayaient de comprendre comment l'information tombée dans le trou noir pouvait s'en échapper. Leonard Susskind, de l'université Stanford, et Gerard 't Hooft, de l'université d'Utrecht aux Pays-Bas, proposèrent une solution étonnante reposant sur un principe dit de complémentarité des trous noirs. Pour l'essentiel, d'après ce principe, un observateur plongé dans un trou noir voit l'information qui s'y trouve, alors qu'un observateur extérieur voit la même information sortir de l'astre. Selon ces physiciens, il n'y a pas de contradiction puisque les deux observateurs, situés de part et d'autre de l'horizon des événements, ne peuvent pas communiquer.

La dualité de Maldacena et la complémentarité des trous noirs semblaient dissiper tous les paradoxes. La première implique la conservation de l'information, la seconde indique comment l'information s'échappe du trou noir. Mais de nombreux détails restaient à vérifier. Il y a trois ans, mes collègues et moi (AMPS) avons essayé de combiner toutes ces idées pour voir s'il restait des contradictions, en se fondant sur des travaux de Samir Mathur, de l'université d'État de l'Ohio, et Steven Giddings, de l'université de Californie à Santa Barbara (et en prolongeant, sans le savoir, un raisonnement plus ancien de Samuel Braunstein, de l'université d'York au Royaume-Uni). Après de vaines tentatives d'obtenir un modèle qui fonctionne, nous avons compris que le problème était plus profond et ne se résumait pas à nos faiblesses mathématiques : une contradiction demeurait.

Cette contradiction surgit quand on considère le phénomène d'intrication quantique entre particules. L'intrication est sans doute l'aspect de la physique quantique le plus contraire à l'intuition et le plus éloigné de notre expérience. Si les particules étaient des dés, deux particules intriquées seraient comme deux dés dont la somme des faces affichées est toujours égale à sept : si vous lancez les dés, et que le premier affiche deux, alors le second indiquera forcément cinq. De la même façon, quand les physiciens mesurent les propriétés d'une particule intriquée, la mesure détermine aussi les caractéristiques de sa partenaire.

... au mur de feu

1997
Juan Maldacena propose la dualité qui porte son nom

2004
Stephen Hawking admet que l'information est préservée dans un trou noir.

2013
Joseph Polchinski postule l'idée de mur de feu.

Le mur de feu est une manifestation de la limitation de nos formulations actuelles de la gravité quantique

Par ailleurs, une particule ne peut pas être complètement intriquée en même temps avec deux systèmes quantiques différents (des particules ou des groupes de particules). L'intrication est exclusive ou « monogame ».

Dans le cas du trou noir, considérons une particule du rayonnement de Hawking, notée B, émise lorsque le trou noir est plus qu'à moitié évaporé. Le processus de Hawking implique que B fait partie d'une paire et que sa partenaire A tombe dans le trou noir. Les particules A et B sont intriquées. Cependant, en accord avec le principe de complémentarité des trous noirs, l'information qui est tombée dans le trou noir lors de sa formation est encodée dans l'ensemble des particules du rayonnement de Hawking. Donc, si l'information n'est pas perdue, la particule B doit être intriquée avec une combinaison C des autres particules du rayonnement de Hawking qui se sont déjà échappées. Mais il y a alors une contradiction : la particule B est intriquée avec deux systèmes différents, A d'une part, C d'autre part. On a ici un cas de polygamie !

Comment respecter les règles de la physique quantique et ne pas perdre l'information dans le trou noir ? La solution est de rompre l'intrication entre A et B, apparues sous la forme d'une paire particule-antiparticule sur l'horizon des événements. Dans la théorie quantique, la rupture d'un lien d'intrication, comme celle d'une liaison chimique, se traduit par une libération d'énergie. Casser l'intrication de toutes les paires virtuelles sur l'horizon des événements conduit à peupler cette région en particules de haute énergie. Autrement dit, l'horizon devient un « mur de feu ».

Un astronaute qui chuterait vers le trou noir, plutôt que de traverser l'horizon en douceur, rencontrerait un milieu extrême.

La découverte d'une telle rupture avec la relativité générale (un mur d'énergie à un endroit où rien de particulier ne devrait se passer) était dérangeante, mais le raisonnement était simple, et nous ne trouvions pas de faille. D'une certaine façon, nous avions repris à l'envers l'argument original de Stephen Hawking, en supposant que l'information n'est pas perdue et en regardant où cette hypothèse mènerait. Nous avons conclu qu'il y avait une faille dans la relativité générale. Lorsque nous avons exposé notre raisonnement à d'autres physiciens, la réaction initiale était un grand scepticisme, auquel succédait une perplexité comparable à la nôtre.

Soit ces étranges murs de feu existent vraiment, soit il semble que nous devrions une fois de plus envisager de renoncer à certains principes de la théorie quantique. Il se peut que l'information ne soit pas détruite, mais peut-être qu'une réécriture de la physique quantique est à prévoir.

Malheureusement, l'observation de trous noirs réels ne tranchera pas la question : tout rayonnement émanant d'un mur de feu serait très faible et difficile à voir.

Si les murs de feu existent, ils pourraient avoir des conséquences étonnantes. L'une d'elles est qu'ils pourraient marquer la fin de l'espace. Les conditions pour que l'espace-temps se forme n'existeraient pas à l'intérieur du trou noir. Donald Marolf a avancé l'idée que l'intérieur ne peut pas se former parce que « la mémoire quantique du trou noir est pleine ». Si l'espace-temps ne peut pas se trouver à l'intérieur, alors

LA *FUZZBALL* : UNE AUTRE VISION DES TROUS NOIRS

Selon Samir Mathur, de l'université d'État de l'Ohio, un trou noir ne consisterait pas en une singularité de densité infinie entourée d'un horizon des événements, et ne [illegible] de l'espace-temps, nommée *fuzzball*, composée de cordes, ces objets élémentaires introduits par la théorie du même nom.

Cette modélisation résout de nombreux problèmes, comme la présence d'une singularité et la non-conservation de l'information. En effet, la surface de la *fuzzball*, structurée par les cordes fondamentales, est rendue floue (*fuzzy* en anglais) par les effets quantiques et est située juste au-delà de la position de l'horizon selon la relativité générale.

Pour certains physiciens, l'absence de singularité et d'horizon rend la *fuzzball* plus proche de l'étoile à neutrons que du trou noir. Il s'agirait de l'état de la matière le plus compact possible. La surface de la *fuzzball* n'entoure cependant pas un volume de matière répartie dans l'espace, elle marque la fin quantique de ce dernier.

Il existe tout de même certaines similarités avec le trou noir. Samir Mathur a montré que l'aire d'une *fuzzball* de masse donnée est presque identique à celle de l'horizon des événements d'un trou noir classique de même masse. Il a de plus calculé son entropie, qui correspond à l'agencement des cordes, et a obtenu un résultat voisin de la formule de Bekenstein pour un trou noir.

La *fuzzball* émet par ailleurs un rayonnement dont les caractéristiques rappellent le rayonnement de Hawking des trous noirs. Néanmoins, le trou noir et la *fuzzball* se distinguent par leur description quantique, ce qui est important pour la question de la conservation de l'information.

La difficulté ne se présente pas avec la *fuzzball*, car il n'y a pas d'horizon des événements. L'information contenue dans la matière lors de sa formation s'échappe avec le rayonnement et il est possible, en théorie, de la reconstituer, contrairement au cas du trou noir.

En ce qui concerne la matière qui tombe sur une *fuzzball*, Samir Mathur pense que, par interaction avec la surface, elle induit des vibrations quantiques de cette dernière. L'information apportée s'ajouterait alors à celle de la *fuzzball* sans être perdue, et un observateur en chute libre vers une *fuzzball* suffisamment massive ressentirait quasiment ce que prédit la relativité générale pour un trou noir : rien de spécial puis un écartèlement chaotique.

Le mur de feu proposé par Joseph Polchinski et ses collègues n'existerait pas en raison d'une hypothèse injustifiée dans leur étude. Ces divers travaux restent toutefois très spéculatifs et le débat est loin d'être clos.

Sean Bailly

l'espace prend fin à l'horizon, et l'astronaute qui y tombe se dissout en bits quantiques d'information au niveau de cette frontière. Et si le mur de feu existe, quelles seraient les implications pour les trous noirs réels, tel celui qui occupe le centre de la Voie lactée ? Il est trop tôt pour le dire.

Pour éviter des scénarios aussi étranges, les physiciens ont tenté de contourner la conclusion du mur de feu. Une piste consiste à dire que la particule B du rayonnement de Hawking peut être intriquée à la fois avec A et avec C si la particule A fait partie du système C : la particule se trouvant sous l'horizon est, d'une certaine façon, le même bit d'information que celui encodé dans le rayonnement de Hawking, même s'ils se trouvent à des endroits très différents.

Cette notion rejoint l'idée originale de complémentarité des trous noirs, mais pour faire de ce scénario un modèle concret, il semble encore nécessaire de modifier la physique quantique. Une façon radicale d'éviter cette difficulté est l'idée de Juan Maldacena et Leonard Susskind consistant à supposer que, dans chaque paire, les particules intriquées sont connectées par un microscopique trou de ver spatio-temporel. Une autre approche est de partir du principe que l'horizon des événements n'existe pas *(voir l'encadré ci-dessus)*.

Stephen Hawking pensait que la relativité générale s'applique correctement aux trous noirs tandis que la physique quantique y atteint ses limites. Juan Maldacena concluait que la physique quantique n'est pas modifiée, mais que l'espace-temps est holographique. Peut-être la vérité se trouve-t-elle à mi-chemin.

Beaucoup d'idées ont été avancées, la plupart d'entre elles abandonnant l'un ou l'autre des principes admis de longue date. Il n'y a pas de consensus sur la bonne direction à suivre pour résoudre ces questions. Pour le moment, les chercheurs sont captivés par la découverte d'une nouvelle contradiction entre les deux théories centrales de la physique. Notre incapacité à déterminer si le mur de feu est une réalité traduit la limitation de nos formulations actuelles de la gravitation quantique. Les physiciens doivent repenser leurs hypothèses sur les rouages de l'Univers.

Ces remises en cause feront peut-être naître une compréhension plus profonde de la nature de l'espace-temps et des principes qui sous-tendent toutes les lois de la physique. À terme, en démêlant les paradoxes au cœur du mur de feu des trous noirs, nous réaliserons peut-être la percée nécessaire pour unifier la physique quantique et la relativité générale en une seule théorie. ■

BIBLIOGRAPHIE

A. Almheiri *et al.*, **Black holes : complementarity or firewalls ?**, *JHEP*, vol. 2013, n° 2, article 62, 2013.

R. Parentani, **Les prédictions de Stephen Hawking**, *Dossier Pour la Science*, n° 75, avril-juin 2012.

L. Susskind, **Trous noirs : la guerre des savants**, Robert Laffont, 2010.

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

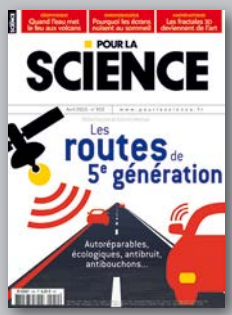
N° 455 – septembre 2015
Réf. M0770455

N° 454 – août 2015
Réf. M0770454

N° 453 – juillet 2015
Réf. M0770453

N° 452 – juin 2015
Réf. M0770452

N° 451 – mai 2015
Réf. M0770451



N° 450 – avril 2015
Réf. M0770450

N° 449 – mars 2015
Réf. M0770449

N° 448 – février 2015
Réf. M0770448

N° 447 – janvier 2015
Réf. M0770447

N° 446 – décembre 2014
Réf. M0770446

N° 445 – novembre 2014
Réf. M0770445

N° 444 – octobre 2014
Réf. M0770444

N° 443 – septembre 2014
Réf. M0770443

N° 442 – août 2014
Réf. M0770442

N° 441 – juillet 2014
Réf. M0770441

POUR LA SCIENCE

Complétez votre collection dès maintenant !

5,50€ dès le 2e numéro acheté

À découper ou à photocopier et à retourner accompagné de votre règlement à : Groupe Pour la Science • 628 avenue du Grain d'Or 41350 Vineuil • e-mail : pourlasciencevpc@daudin.fr

☐ Oui, je commande des numéros de *Pour la Science* au tarif unitaire de 5,50€ dès le 2e acheté.

Je reporte ci-dessous les références à 6 chiffres correspondant aux numéros commandés et au format choisi :

1er réf. ..... × 5,50 € = ...
2e réf. ..... × 5,50 € = ...
3e réf. ..... × 5,50 € = ...
4e réf. ..... × 5,50 € = ...
5e réf. ..... × 5,50 € = ...
6e réf. ..... × 5,50 € = ...
Frais port 4,90 € France – 12 € étranger + ...

Je commande **la reliure** *Pour la Science* (capacité 12 n°s) au prix de **14 €** .....

TOTAL À REGLER .....

J'indique mes coordonnées

Nom :
Prénom :
Adresse :
CP : Ville :
Pays : Tél :

Mon 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
N°
Date d'expiration Code de sécurité

Signature (obligatoire)

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

TOUTES LES ARCHIVES DEPUIS 1996 SUR www.pourlascience.fr

Le **daguerréotype** qui mesurait la lumière

Jérôme Fate

Au XIXe siècle, un jeune physicien, Edmond Becquerel, détourne le tout nouveau procédé photographique de Louis Daguerre en un appareil pour analyser la lumière. Il prouve ainsi l'existence des ultraviolets.

Août 1839. Avec éloquence, l'astronome François Arago révèle à l'Académie des sciences le procédé du daguerréotype, une technique photographique « exacte », « prompte », « économe » et « à la portée de tout le monde », découverte par l'artiste Louis Daguerre « à la suite d'un nombre immense d'essais minutieux, pénibles, dispendieux ». Daguerre produit des positifs simples par réaction photochimique en exposant à la lumière solaire des plaques métalliques recouvertes d'halogénures d'argent.

L'invention, nommée daguerréotypie, suscite vite des passions, tant parmi les scientifiques de renom que chez d'autres en devenir, tel Edmond Becquerel, tout juste licencié ès sciences physiques à la faculté des sciences de Paris. Le jeune homme s'empare de la technique. Il n'a que 19 ans, appartient à la bourgeoisie parisienne et dispose des moyens financiers et des connaissances scientifiques nécessaires à sa pratique. Il apprend à en maîtriser les procédés et réalise dès cette date de nombreux daguerréotypes, apportant même des améliorations à l'invention de Daguerre. Cette nouvelle passion l'amène aussi à mettre au point un appareil au fonctionnement inédit, l'actinomètre électrochimique, pour étudier un sujet très débattu à l'époque : la nature du rayonnement solaire.

Le cheminement conduisant à la construction d'un appareil destiné à comprendre un nouveau phénomène et à en expliquer les mécanismes est un événement singulier dans l'histoire des sciences lorsque cet instrument ne s'inscrit pas *a priori* dans un cadre théorique stabilisé. En effet, dans ces conditions, il n'est pas possible de justifier du fonctionnement de l'appareil par des références à des connaissances maîtrisées. La correspondance des premiers résultats obtenus grâce à celui-ci avec un savoir déjà accepté semble alors le seul moyen de donner un certain degré de fiabilité aux principes avancés pour en

CE DAGUERREOTYPE DE PARIS a été réalisé par Edmond Becquerel en 1840, dès la divulgation du procédé. Un an plus tôt, le jeune homme s'est passionné pour cette technique, qu'il a même améliorée

L'ESSENTIEL

- En 1839, E. Becquerel se passionne tant pour la photographie que pour l'étude de la lumière.
- Une dispute avec le physicien Biot l'amène à les combiner en un nouvel appareil.
- Il mesure ainsi le profil du spectre solaire et prouve l'existence de lumière invisible au-delà du violet.

ustifier l'usage. Et quand l'objet d'étude est ussi complexe et discuté que la nature du ayonnement solaire, un tel processus est écessairement soumis à la discussion de la ommunauté scientifique. Non seulement e jeune Becquerel surmonte ces difficultés, ais son actinomètre lui permet d'apporter des éléments nouveaux au débat sur la nature de la lumière et ses effets sur la matière.

La lumière, corpuscule ou onde ?

usqu'au début du XIX[e] siècle, la théorie dominante expliquant la nature de la umière est celle de Newton, dans laquelle a lumière est constituée de « corpuscules » de masse non nulle disposant de multiples ropriétés, pour la plupart inaccessibles à 'expérience. Mais, au cours du XVIII[e] siècle t au début du XIX[e], elle s'est complexifiée our tenter d'intégrer les nombreuses anomalies que les découvertes expérimentales ont apparaître.

Lorsque le physicien Augustin Fresnel publie en 1818 une théorie ondulatoire de la lumière expliquant de manière beaucoup plus simple les phénomènes anciens ainsi que la plupart des anomalies, une controverse s'engage entre les défenseurs des deux théories. Si les jeunes scientifiques ont vite adopté la théorie ondulatoire, certains conservateurs défendent la théorie newtonienne avec acharnement, tel le physicien Jean-Baptiste Biot. Néanmoins, lorsque Becquerel commence ses recherches, en 1839, la théorie corpusculaire de Newton est déjà quasiment abandonnée.

Le jeune homme vient d'obtenir sa licence et, accompagné dans sa pratique par son père, l'académicien Antoine-César Becquerel, il s'est lancé dans l'analyse des effets de la lumière, en particulier la lumière solaire. Premier d'une dynastie qui atteindra les sommets de la reconnaissance scientifique quand Henri, fils d'Edmond, obtiendra le prix Nobel de physique aux côtés des Curie, Edmond porte en partie la responsabilité de a réussite sociale de sa famille. Son père, ssu d'un milieu modeste, parvenu au prix de lourds efforts et de grands sacrifices à 'élever dans l'échelle sociale, enseigne très ôt à ses descendants le goût de la réussite et de l'ascension sociale. La voie scientifique en est un moyen privilégié au XIX[e] siècle.

César n'a pas seulement des ambitions sociales : il a des partis pris scientifiques et méthodologiques marqués. Il estime qu'il n'est pas possible de travailler en physique de façon purement théorique comme ce peut être le cas dans les grandes écoles à l'époque. Pour lui, rien ne sert d'élaborer des hypothèses discutables si elles ne sont pas inspirées par l'expérience. Par cette école paternelle, Edmond est préparé à se construire un parcours professionnel particulier, éloigné des habitudes de l'époque. D'abord brillant élève du collège Bourbon, il devient en 1839 assistant de son père à la chaire de physique appliquée au Muséum national d'histoire naturelle.

En 1840, il soutient une « double thèse » de doctorat en physique et en chimie à la faculté des sciences de Paris intitulée *Des effets chimiques et électriques produits sous l'influence de la lumière solaire*. Dans ce travail, il tente de comprendre, d'expliquer et même d'évaluer de manière objective les effets de la lumière solaire sur la matière par l'intermédiaire des courants électriques que la lumière y produit. Il veut s'affranchir de toute interprétation liée à la perception visuelle et pense qu'en mettant au point un appareil permettant de mesurer ces effets électriques, il pourra sinon les quantifier, au moins les évaluer.

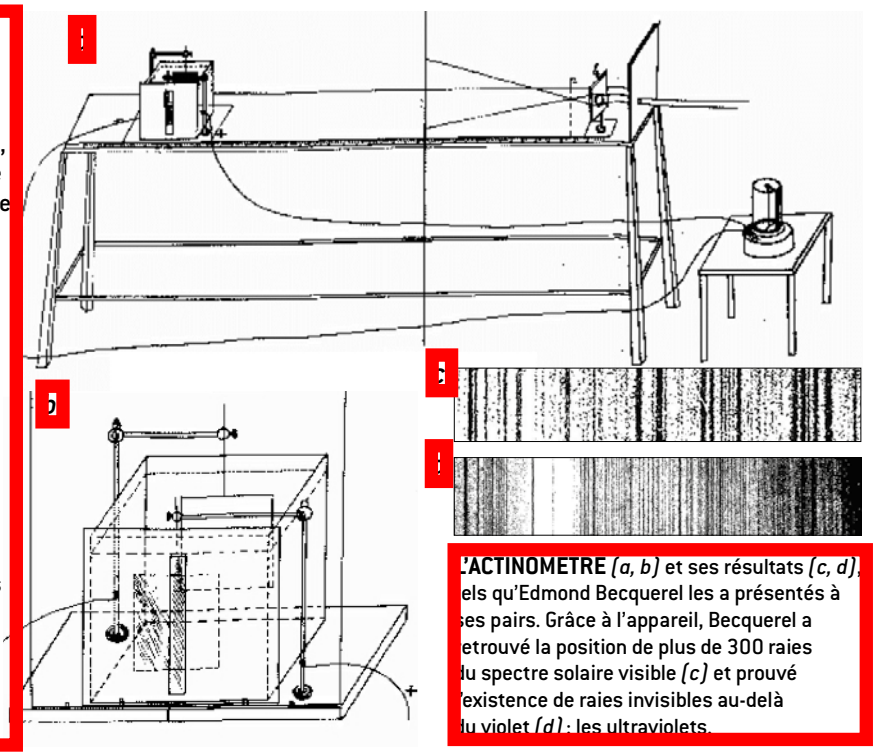
L'objection de Biot

Pour Becquerel, la quantité de rayons solaires est proportionnelle à la quantité de substance qui réagit, laquelle est proportionnelle au maximum de déviation du galvanomètre relié à la substance. Alors doyen de la faculté des sciences de Paris et membre de l'Académie des sciences, Biot réagit très vivement, dès la première publication de Becquerel sur ce sujet. Théoricien chevronné, il est reconnu par ses contemporains comme un expérimentateur de talent. Le désaccord entre les deux physiciens repose, caché derrière des considérations expérimentales, sur leurs conceptions de la nature de la lumière.

Dans son article, Becquerel propose la description de différents appareils destinés à réaliser son projet. L'un d'eux est constitué d'un vase noirci contenant des liquides superposés d'inégales densités. Dans chacun de ces liquides est dissoute une substance qui doit réagir avec celle du second liquide sous l'effet de la lumière. Lors de la réaction photochimique, le déséquilibre électrochimique

L'ACTINOMETRE ELECTROCHIMIQUE DE BECQUEREL

L'appareil *(a)* est constitué d'une table, au bout de laquelle la lumière solaire entre à travers un petit trou percé dans un écran. La lumière traverse un prisme qui la décompose, afin que l'on puisse choisir la lumière monochromatique souhaitée. À l'autre bout de la table, la mesure s'effectue dans une cuve *(b)* constituée d'une boîte opaque remplie d'eau acidulée où plongent deux plaques d'argent recouvertes de bromure d'argent. Chaque plaque est reliée à une borne d'un galvanomètre placé loin de la table. On peut, par l'intermédiaire d'une trappe mobile, n'éclairer qu'une plaque avec la lumière décomposée, l'autre restant dans l'obscurité. L'appareil est utilisable plus d'une dizaine d'heures avec les mêmes plaques, ce qui permet d'obtenir des résultats comparables, et donc de tirer des conclusions sur les effets des différentes lumières étudiées.



L'ACTINOMETRE *(a, b)* et ses résultats *(c, d)*, tels qu'Edmond Becquerel les a présentés à ses pairs. Grâce à l'appareil, Becquerel a retrouvé la position de plus de 300 raies du spectre solaire visible *(c)* et prouvé l'existence de raies invisibles au-delà du violet *(d)* : les ultraviolets.

créé est mesuré par un galvanomètre dont chaque borne est reliée à une électrode de platine plongeant dans chacun des liquides.

Mais Biot, qui refuse la proportionnalité entre la mesure du courant et la quantité de rayons, cherche un moyen de la discréditer sur le plan expérimental. Il objecte alors qu'il peut y avoir des effets de la lumière directement sur les électrodes de platine, s'ajoutant de manière inquantifiable aux effets attendus et rendant la comparaison des mesures inutile. Becquerel doit répondre à cette objection pertinente.

La lumière produit bien un effet électrique

Pour ce faire, il propose un nouveau système expérimental, composé d'une « boîte en bois noircie intérieurement et divisée, au moyen d'une membrane très mince, en deux compartiments », remplie d'eau légèrement acidulée, dans laquelle plongent deux plaques de platine, reliées chacune à une borne d'un galvanomètre. L'équilibre entre les électrodes s'effectuant dans l'obscurité, il éclaire ensuite une seule des deux électrodes. Si une réaction photochimique a lieu, elle ne se produira que sur la plaque éclairée. Il devrait apparaître un déséquilibre électrique et l'aiguille du galvanomètre devrait être déviée. Il s'agit donc, en utilisant le principe d'une mesure d'un courant, d'évaluer les effets de la lumière solaire sur la matière *via* une mesure différentielle.

Réalisant des mesures avec des plaques de platine nues, Edmond Becquerel mesure dans un premier temps des courants, mais, en reproduisant ces expériences avec les mêmes plaques décapées et chauffées au rouge, il ne mesure plus rien. Il en conclut que les premiers effets mesurés étaient dus à une couche d'impuretés ou de poussières présente à la surface des plaques avant chauffage. Comme les plaques du premier appareil étaient décapées, il considère ses résultats comme validés : les électrodes ne contribuant pas elles-mêmes aux courants mesurés, il a donc bien obtenu des courants mesurables.

Ce résultat est actuellement celui retenu dans la plupart des documents de vulgarisation traitant d'énergie renouvelable solaire, plaçant Becquerel comme découvreur de l'effet photovoltaïque, puisqu'il est le premier à mesurer des effets électriques produits par la lumière. S'il utilise ce terme en 1839, l'effet mis en évidence n'est que chimique et n'a que peu de rapport avec celui intervenant dans les panneaux solaires actuels, où l'électricité est produite par des semi-conducteurs. Les panneaux solaires ne se dégradent pas sous l'effet de la lumière, contrairement aux substances photosensibles, en photographie par exemple.

Satisfait, Becquerel va plus loin. La présence d'effets électriques mesurables lorsqu'une couche très fine de substance recouvre les plaques (les impuretés de son expérience avec les plaques nues) l'amène à imaginer se servir de son appareil de manière différente. En effet, il utilise, dans la pratique du daguerréotype, des plaques d'argent recouvertes d'une mince couche d'halogénure d'argent réactif à la lumière. Il imagine donc de remplacer dans son appareil les plaques de platine par des plaques dont il dit lui-même qu'il les prépare de la même façon que les plaques daguerréotypes.

Les mesures qu'il effectue avec ce système le conduisent à présenter les conclusions suivantes à l'Académie des sciences :

1) Des rayons qui accompagnent les rayons les plus réfrangibles de la lumière solaire, font éprouver à des lames métalliques plongées dans un liquide, une action telle, qu'il en résulte des effets électriques auxquels on ne peut attribuer une origine calorifique.

2) La décomposition du chlorure, du bromure et de l'iodure d'argent sous l'influence

de la lumière, produit des effets électriques qui peuvent servir à déterminer le nombre de rayons chimiques actifs.

À l'époque, le terme « rayons chimiques » désigne les rayons qui provoquent les réactions photochimiques. Leur nature n'étant pas connue, c'est ce que Becquerel explore. On parle aussi à l'époque de rayons calorifiques (qui provoquent la sensation de chaleur) et de rayons phosphorogéniques (provoquant la phosphorescence).

Dès ce moment, Becquerel envisage d'utiliser les résultats de cet appareil pour analyser quantitativement la lumière, par l'intermédiaire des effets qu'elle produit sur les halogénures d'argent. Ses principes expérimentaux restent identiques, mais le fondement de ses travaux s'inverse. Jusque-là, il s'agissait d'étudier les effets de la lumière sur la matière en faisant varier les substances analysées. Dorénavant, la substance étant fixe, il étudie la lumière elle-même.

De nouveau, Biot s'oppose à ces conclusions, puisqu'elles impliquent une proportionnalité entre courant mesuré et quantité de lumière. Il objecte que ces effets, s'ils accompagnent la lumière, sont sans doute provoqués par des éléments associés aux corpuscules qui la constituent. Mais la quantité qui se propage avec chaque corpuscule est inconnue et sans doute variable. Étudier la lumière de manière quantifiée est alors encore plus problématique que d'en étudier ses effets. Mais que faudrait-il à Becquerel pour ne plus subir ce type d'objection ? Obtenir, grâce à son système d'analyse des rayons chimiques, des résultats acceptés par tous, même les newtoniens, pour la lumière visible. Il décide pour cela d'ajouter à son appareil un prisme pour décomposer la lumière solaire. Il espère ainsi retrouver, sous la forme de courants, les raies qui composent le spectre lumineux.

Il modifie donc son appareil et le présente, en 1841, sous le nom d'actinomètre électrochimique *(voir l'encadré page ci-contre)*. Le terme actinomètre désigne à l'époque les appareils permettant de mesurer l'activité de la lumière solaire. L'actinomètre électrochimique permet donc d'effectuer ces mesures par l'intermédiaire d'un procédé électrochimique.

EDMOND BECQUEREL (1820-1891)

JEAN-BAPTISTE BIOT (1774-1862)

Toutes les archives

- Pour la Science
- Dossier Pour la Science

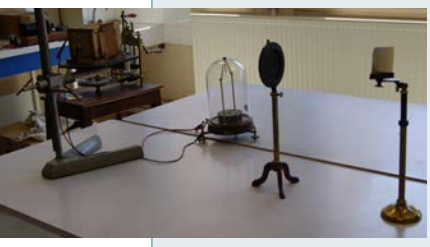
depuis 1996

Disponibles sur www.pourlascience.fr*

*Numéros à lire en ligne ou à télécharger au format PDF

Une réplique de l'appareil

La réplication d'expériences historiques est l'un des outils dont disposent les historiens des sciences pour explorer un sujet. Ses principes [illegible], le cas échéant, leur reconstruction avec les techniques anciennes, afin de réaliser les expériences anciennes à l'identique de celles décrites et publiées.



L'enjeu n'est pas de vérifier si le chercheur de l'époque s'est trompé ou non, mais de comprendre comment sont obtenus les résultats. Les expériences d'Edmond Becquerel ont toutes été répliquées. On a ainsi pu renforcer la conviction que les techniques daguerréotypes ont joué un grand rôle dans la mise en œuvre de l'actinomètre électrochimique. On a aussi établi des liens entre divers savoir-faire artisanaux – en tonnellerie puisqu'on utilise des boîtes en bois étanches – et d'autres travaux postérieurs de Becquerel. Sans cette exploration par réplication, ces informations seraient restées masquées.

J. F

À l'aide de l'actinomètre, Becquerel analyse de façon très précise les effets de la lumière solaire. Il affine de plus en plus les parties de spectre qu'il fait entrer dans la cuve de l'actinomètre, afin d'étudier les effets de chacune des parties, et mesure par l'intermédiaire du galvanomètre les courants correspondants produits.

À la fin de 1841, il observe qu'il y a de nombreuses zones du spectre solaire qui ne produisent pas d'effet sur le galvanomètre. Il en déduit donc qu'il n'y a pas de lumière dans ces zones. Il vérifie ainsi les positions de plus de 300 des raies répertoriées par Joseph Fraunhofer une vingtaine d'années plus tôt avec son œil comme détecteur. Fabricant allemand d'instruments d'optique, Fraunhofer avait à cette fin utilisé une lunette équipée d'un réseau d'excellente qualité de sa fabrication pour décomposer la lumière. Il est l'inventeur du spectroscope.

Pour Becquerel, et malgré les remarques persistantes de Jean-Baptiste Biot, cette concordance de résultats, par des moyens très différents, prouve l'efficacité de son appareil. Il peut lui répondre que son appareil n'est pas seulement un détecteur d'éléments congénères à la lumière produisant les effets chimiques, mais un détecteur de lumière qui en permet l'analyse par la mesure des effets électrochimiques. L'actinomètre électrochimique est devenu un appareil efficace pour analyser la lumière solaire. Il n'a plus besoin de justifier, pour ses expériences, d'une quelconque proportionnalité, puisqu'il s'agit ici seulement d'une question binaire : présence ou non de rayons lumineux et de rayons chimiques.

Edmond Becquerel peut alors diriger ses recherches dans une direction nouvelle. Il a observé depuis longtemps que des effets importants se produisent sur le bromure d'argent dans l'extrémité violette du spectre. Il se lance donc dans l'analyse de celle-ci, et de la zone au-delà du violet. En 1843, il détecte, grâce à l'actinomètre, la présence de trois raies sombres dans cette zone invisible. Ce résultat sera essentiel pour déterminer l'étendue de ce qu'on nomme lumière. En effet, d'une part, la présence de ces raies prouve, par l'identité des propriétés, que ce qui est analysé est bien de la lumière, même si elle est invisible pour l'œil humain. D'autre part, le fait que cette analyse se fasse en déplaçant simplement le spectre pour envoyer dans la cuve ce qui se trouve au-delà du violet prouve que cette lumière invisible se situe dans la continuité du spectre solaire visible. Il conclut d'ailleurs un article en disant que les ultraviolets « existent, et ce qui le prouve, ce sont les raies que l'on trouve dans cette partie du spectre ».

De la lumière invisible au-delà du violet

Vingt ans plus tôt, le physicien allemand Johann Ritter avait lui aussi découvert le rayonnement ultraviolet, mais il n'avait pas compris qu'il s'agissait de rayons de même nature que la lumière visible et sa trouvaille n'avait pas eu d'écho. Les travaux de Becquerel ont un retentissement important, puisqu'ils permettent d'élargir les connaissances sur la nature de la lumière, ses propriétés et son étendue. Après ces travaux, on considérera, pendant toute la période où la théorie ondulatoire de la lumière dominera, que l'étendue de ce qu'on nomme « lumière » est plus vaste que ce que peut voir l'œil humain. Il y a de la « lumière invisible » après le violet, et elle est de même nature que la lumière visible. Plus tard, avec les travaux de Maxwell, ce spectre sera étendu à l'ensemble des rayonnements électromagnétiques.

La théorie ondulatoire de Fresnel et Becquerel n'est plus celle en vigueur aujourd'hui. Néanmoins, les modèles suivants de la lumière, qui reposent sur la mécanique quantique, ne remettront pas en cause cette continuité du spectre électromagnétique. ■

L'AUTEUR

Jérôme FATET est maître de conférences en histoire et épistémologie des sciences à l'université de Limoges

BIBLIOGRAPHIE

J. Fatet, **Le Soleil, source de controverse scientifique au milieu du XIXe siècle ?**, dans *Dans le champ solaire* (sous la dir. de S. Le Gars et G. Boistel), pp. 123-140, Hermann, 2015.

J. Frercks *et al.*, **Reception and discovery : the nature of Johann Vilhelm Ritter's invisible rays**, *Studies in History and Philosophy of Science*, vol. 40, pp. 143-156, 2009.

J. Fatet, **Les recherches d'Edmond Becquerel sur la nature de la lumière entre 1839 et 1843. Histoire d'une interaction réussie entre science et photographie**, thèse de doctorat, 2005.

les conférences
cité des sciences & de l'industrie
à la Cité des sciences et de l'industrie
ntrée ore dans la mite des places disponible
Les samedis
du 19 septembre 2015
au 30 janvier 2016 à 14h30
au droit
CYCLE DE 12 CONFÉRENCES
Révolutions animales : de la sc
En quatre actes, des experts, des chercheurs,
des penseurs, des juristes portent
un nouveau regard sur les animaux
et suscitent le débat sur leurs droits.
Conseillère scientifique : Karine Lou Mat gnon,
auteure, journaliste, présidente de l'asso ation
Animal Révolutions.
vec, entre autres : Eric Baratay, Marc Bek
es Bœuf, Florence Burgat, Aymeric Caron,
Valérie Chansigaud, David Chauvet, Yves Christen,
Vinciane Despret, Ludovic Dickel, Antoine Goetschel,
Raphaël Larrère, Thomas Lepe ier, Pierre Jouvent n,
Steve Wise, ...
rogramme complet su
cite-sciences.fr
vec le soutien d
arte
LLL LES LIENS QUI LIBÈRENT
le magazine 30 millions d'amis
POUR LA SCIENCE
inter
culture plus

les conférences
Palais DÉCOUVERTE
au Palais de la découverte
ntrée ore dans la mite des places disponibles
Les jeudis du 15 octobre
au 10 décembre 2015
à 19h
temps
CYCLE DE 7 CONFÉRENCES
1915-2015 : l'odyssée de l'espac
Hommage au travail et à l'hér age
d'Einstein sur la gravitation
Conse ers scientifiques : Jean-Michel A mi,
Jean-Pierre Mar n, David Valls-Gabaud
vec : Aurélie Barrau, Lucian Boi, Philippe Br x,
Pier Stefano Corasani, Jean Eisenstaedt,
Gilles Esposi o-Farèse, Éric Gourgoulhon,
Jean-Marc Lévy-Leblond, Jean-Pierre Luminet
rogramme complet su
palais-decouverte.fr
n partenariat avec
SAF
l'Observatoire de Paris
SF2A
2015 ANNÉE DE LA LUMIÈRE EN FRANCE
vec le soutien d
LA RECHERCHE L'ACTUALITÉ DES SCIENCES
L'ASTRONOMIE
CIEL & ESPACE
POUR LA SCIENCE
culture plus

Abonnez-vous à

POUR LA SCIENCE

En CADEAU de bienvenue :

Les gènes voyageurs, d'Eric Bapteste

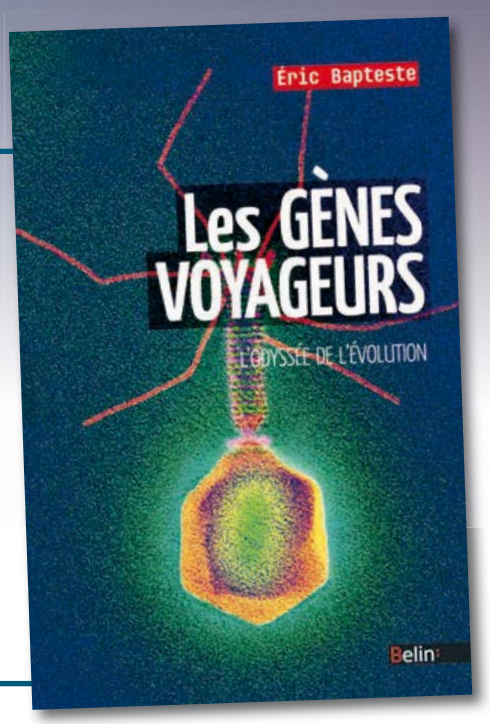
Savez-vous que l'échangisme est une pratique très répandue chez les microbes ? Que des organismes comme les plantes ou les animaux deviennent en partie ce qu'ils mangent ? Que les bactéries sont impliquées dans des guerres qui durent des millions d'années et qu'elles entretiennent une vie sociale intense ? Ces phénomènes biologiques sont provoqués par des voyages de gènes inattendus, qui transforment la majeure partie du vivant. Une découverte récente qui pourrait bien révolutionner les sciences de l'évolution...

Éditions Belin – Paru en 2013 – 192 pages – Prix unitaire : 20,40 €

Votre abonnement INTÉGRAL

8,20€ par mois seulement

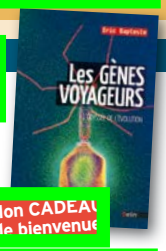
le magazine
+ le hors-série chez vous
+ l'accès numérique illimité à toutes les archives sur **www.pourlascience.fr**



OFFRE SPÉCIALE D'ABONNEMENT

POUR LA SCIENCE

découper ou à photocopier et à retourner accompagné de votre règlement dans une enveloppe non affranchie à :
roupe Pour la Science - Service Abonnements - Libre réponse 90 382 - 75 281 Paris cedex 06



Mon CADEAU de bienvenue

1. MA FORMULE

❑ **OUI, je m'abonne à l'offre « Intégrale » à 8,20€ par mois.**

Je reçois **le magazine *Pour la Science*** (12 n°s/an)
+ son hors-série *Dossier Pour la Science* (4 n°s/an)
+ mon livre. Je bénéficie aussi de l'accès numérique illimité aux archives sur **www.pourlascience.fr.**

Mon e-mail obligatoire pour l'accès aux contenus numériques (à remplir en majuscules)

@

réception de votre bulletin, comptez 5 semaines pour recevoir votre n° d'abonné. Passé ce délai, merci d'en faire la demande à abonnements@pourlascience.fr

2. MES COORDONNÉES

Nom :
Prénom :
Adresse :
Code postal : Ville :
Pays : Tél. :

3. MON MODE DE RÈGLEMENT

❑ (IPVI) Je règle par prélèvement **8,20€ par mois*** **et reçois en cadeau le livre *Les gènes voyageurs*** (00GEVO). Je remplis l'autorisation ci-dessous en joignant impérativement un IBAN/BIC.

Pour la France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'Europe (pays de la zone SEPA) : 9,60€ par mois. Abonnement en reconduction tacite résiliable à tout moment auprès du service abonnement avec un préavis de 3 mois. Conditions complètes sur www.pourlascience.fr

AUTORISATION DE PRÉLÈVEMENT PAR MANDAT SEPA

En signant ce mandat SEPA, j'autorise Pour la Science à transmettre des instructions à ma banque pour le prélèvement de mon abonnement dès réception de mon bulletin. Je bénéficie d'un droit de rétractation dans la limite de 8 semaines suivant le premier prélèvement. Plus d'informations auprès de mon établissement bancaire.

- COORDONNÉES DU TITULAIRE DU COMPTE

Nom, prénom
Adresse
Numéro et nom de la rue

- COORDONNÉES BANCAIRES

IBAN
Numéro d'identification international du compte bancaire – IBAN (International Bank Account Number)

BIC
Code international d'identification de votre banque – BIC (Bank Identifier Code)

Type de paiement : Paiement récurrent/répétitif

POUR LA SCIENCE

- Date et signature obligatoire

Date
Signature

NOM DU CRÉANCIER

Pour la Science – 8 rue Férou – 75006 Paris

ICS N° FR92ZZZ426900

N° de référence unique de mandat (RUM)

Zone réservée au service abonnement. Ne rien inscrire.

❑ (IIA) Je préfère régler mon abonnement d'un an en **une seule fois 99€**** **sans bénéficier du cadeau.**

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

❑ Par chèque à l'ordre de *Pour la Science*
❑ Par carte bancaire N°
Date d'expiration Clé

Signature obligatoire

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 ❑

Offre réservée aux nouveaux abonnés

PLS456B

LOGIQUE & CALCUL

Déléguer un calcul sans divulguer ses données

Vous confiez des calculs à un tiers, il les effectue et vous transmet les résultats, mais sans avoir pu connaître ni les données du calcul ni ses résultats : un nouveau miracle cryptographique !

Jean-Paul DELAHAYE

Si vous êtes prudent, vous chiffrez vos données avant de les confier à un service de sauvegarde extérieur, dans le « cloud » par exemple. Comment demander alors à ce service de prendre les données d'un fichier et d'en calculer la moyenne, ou d'en extraire des informations particulières ? Pour calculer et manipuler des données, il semble qu'il faille les connaître.

Eh bien, non ! C'est tout l'enjeu des systèmes de chiffrement homomorphe : vous permettez à un tiers de calculer avec vos données qu'il ne connaît pas, et il produit un résultat qui lui est illisible, mais que vous savez déchiffrer.

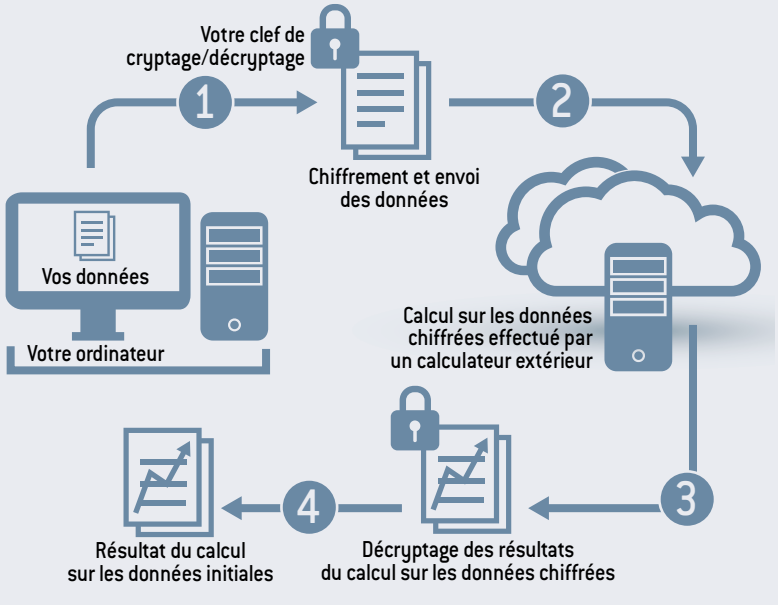
Une méthode très simple : la multiplication

Si les calculs à effectuer sont simples, il est facile d'imaginer une solution. Vous choisissez un nombre C que vous serez le seul à connaître. Vous multipliez toutes vos données par C, et ce sont ces données que vous transmettez à l'opérateur extérieur © chargé de les sauvegarder. Pour connaître par exemple la moyenne de vos données ou de certaines d'entre elles, vous demandez à © de calculer la moyenne sur les données dont il dispose et de vous transmettre le résultat. Puis vous divisez le résultat par C : vous avez votre moyenne, car la moyenne de Cd_1, Cd_2,..., Cd_n est C fois la moyenne de d_1, d_2,..., d_n.

Calcul délocalisé

Avec les chiffrements dits homomorphes, un opérateur calcule sur des données chiffrées dont il n'a pas connaissance. Une fois le calcul [illegible], seul le commanditaire du calcul déchiffre.

Vous chiffrez vos données avec une clef secrète et vous les envoyez à l'opérateur extérieur *(1)*. L'opérateur effectue des calculs avec les données cryptées et vous envoie les résultats (cryptés) sans avoir eu connaissance de la clef *(2, 3)*. Vous déchiffrez les résultats reçus grâce à la clef secrète *(4)* : vous avez ainsi connaissance des résultats d'un calcul que vous n'avez pas fait, résultats auxquels l'opérateur n'a pas pu avoir accès. Pour des calculs simples, des séries d'additions et de soustractions, la mise au point d'applications réelles telles que les systèmes de vote est possible.



Avec ce procédé, vous pouvez faire exécuter par l'opérateur extérieur d'autres types de calculs. Pour connaître le nombre de données qui dépassent un certain nombre B, vous lui demanderez le nombre de données qui dépassent $C\,B$. Le tri de vos données par ordre croissant est aussi faisable, puisque si C est positif, le tri de $C\,d_1, C\,d_2,\ldots, C\,d_n$ exige les mêmes permutations que $d_1, d_2,\ldots, d_n$. Toutes les moyennes pondérées, par exemple la moyenne $(d_1 + 2d_2 + 5d_3 + d_4)/9$, sont aussi possibles sans dévoiler C, car le résultat sur les données multipliées par C est égal à C fois le résultat attendu. Certaines opérations un peu plus compliquées sont envisageables : pour le calcul de $d_1d_2 + d_3d_4 + d_5d_6$, il suffira de diviser le résultat que $\mathcal{O}$ fournit par C^2.

Cependant, vous ne pourrez pas demander $d_1 + d_2d_3$ et, finalement, ce n'est qu'un faible sous-ensemble de calculs que vous saurez faire exécuter à l'extérieur sans avoir à divulguer vos secrets. En particulier, pas question de faire opérer des algorithmes complexes sur vos données, comme l'identification, parmi les nombres confiés, de ceux qui sont des nombres premiers. Remarquons aussi que le chiffrement de vos données en les multipliant par une constante C laisse transparaître certaines informations que vous ne souhaitez peut-être pas que l'opérateur $\mathcal{O}$ connaisse : le numéro de la donnée la plus grande ou la plus petite, les valeurs égales, les données classées, etc.

Le problème sera résolu si vous disposez d'une méthode de chiffrement permettant à la fois de bien masquer toute l'information et autorisant l'exécution d'additions et de multiplications sans rien révéler : avec ces deux opérations, on reconstitue tout calcul.

La solution : des chiffrements pleinement homomorphes

Notons aussi qu'il n'est pas essentiel que l'opération effectuée par $\mathcal{O}$ soit identique à celle que vous voulez au final. En effet, supposons que le chiffrement de la donnée d soit $\mathcal{C}(d)$ et que le déchiffrement (que vous seul savez effectuer) soit l'opération $\mathcal{C}'$: $\mathcal{C}'(\mathcal{C}(d)) = d$. Pour réussir à faire exécuter toutes sortes de calculs par un opérateur extérieur, il suffirait qu'il existe une opération $*_1$ et une opération $*_2$ (pas nécessairement l'addition et la multiplication habituelles) vérifiant :

$\mathcal{C}(d_1 + d_2) = \mathcal{C}(d_1) *_1 \mathcal{C}(d_2)$ (propriété 1)

$\mathcal{C}(d_1 \times d_2) = \mathcal{C}(d_1) *_2 \mathcal{C}(d_2)$ (propriété 2).

En exécutant $*_1$ et $*_2$ à la place de $+$ et $\times$, l'opérateur $\mathcal{O}$ produira à partir des données chiffrées un résultat qui, après le déchiffrement par $\mathcal{C}'$, sera exactement ce que vous voulez.

Par exemple, si vous souhaitez connaître $d_1 + d_2d_3$ sans le calculer vous-même (ce qui est impossible avec la méthode de multiplication par C), vous enverrez vos données cryptées $\mathcal{C}(d_1)$, $\mathcal{C}(d_2)$, $\mathcal{C}(d_3)$ à l'opérateur en lui demandant de calculer $\mathcal{C}(d_1) *_1 (\mathcal{C}(d_2) *_2 \mathcal{C}(d_3))$ et de vous renvoyer le résultat R. Grâce à l'opération $\mathcal{C}'$, vous obtiendrez alors la valeur de $d_1 + d_2d_3$, puisque :

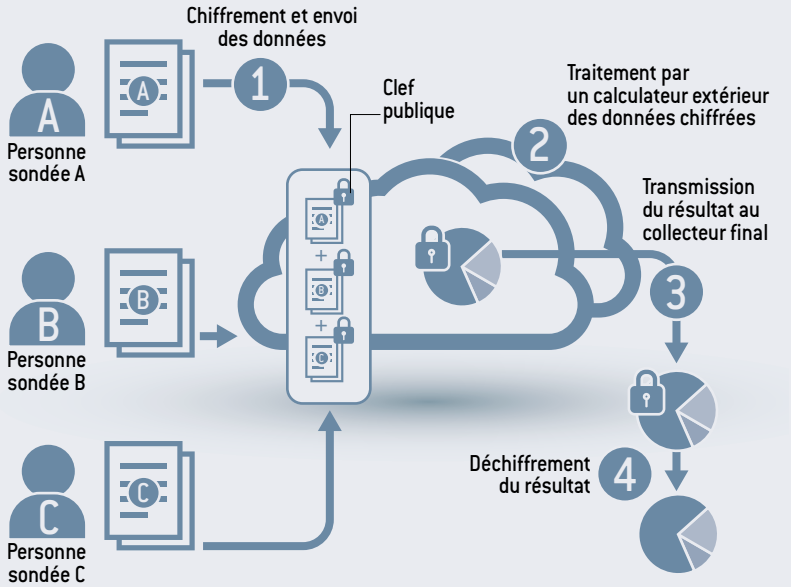
$\mathcal{C}'(R) = \mathcal{C}'[\mathcal{C}(d_1) *_1 (\mathcal{C}(d_2) *_2 \mathcal{C}(d_3))] =$
$\mathcal{C}'[\mathcal{C}(d_1)] + \mathcal{C}'[\mathcal{C}(d_2) *_2 \mathcal{C}(d_3)] =$
$d_1 + \mathcal{C}'[\mathcal{C}(d_2) \times \mathcal{C}'[\mathcal{C}(d_3)]] = d_1 + d_2d_3$.

La méthode fonctionnera pour toute expression, aussi compliquée soit-elle, constituée d'additions et de multiplications. Puisque dès qu'on sait mener des additions

Préserver la confidentialité

Imaginons que l'on souhaite établir une statistique sur un sujet délicat en utilisant Internet et en garantissant à chacune des personnes sondées que ne seront pas divulguées. La procédure est la suivante

Chaque personne chiffre ses réponses avec la clef publique du collecteur final et les envoie à un calculateur extérieur *(1)*. Ce calculateur traite ces données cryptées et envoie le résultat au collecteur final *(2, 3)*. Ce dernier déchiffre le résultat et obtient la statistique souhaitée *(4)*. Le calculateur extérieur ne peut pas accéder aux informations privées des sujets de l'enquête car il ne dispose pas de la clef privée de déchiffrement, et le collecteur final ne peut pas accéder aux données individuelles car il n'a pas eu accès aux informations chiffrées individuelles transmises.



Craig Gentry, le pionnier

En proposant en 2009 le premier système de cryptage complètement homomorphe, Craig Gentry, aujourd'hui chercheur chez IBM, a révolutionné le domaine. Il a déclenché une multitude de travaux qui, petit à petit, ouvrent des voies pour rendre utilisable son idée, initialement théorique pour l'essentiel. Confier de façon massive des calculs à des opérateurs extérieurs qui ne peuvent pas accéder aux données n'est pas aujourd'hui envisageable. En revanche, peu à peu, il est devenu possible de résoudre des problèmes particuliers n'exigeant qu'une petite quantité de calculs homomorphes (comme pour un vote). Les applications de ces méthodes devraient rapidement s'étendre et aider à accroître la sécurité des réseaux et la protection des données... ce dont on a un grand besoin !

et des multiplications de cette façon, on peut exécuter tout algorithme, le problème des calculs secrets par un tiers se ramène à celui de trouver $\mathscr{C}$, $\mathscr{C}'$, $*_1$, $*_2$, vérifiant les propriétés 1 et 2.

Les méthodes de cryptage vérifiant les propriétés 1 et 2 sont dites « pleinement homomorphes ». Le terme vient du langage mathématique où l'on dénomme homomorphisme les fonctions qui transforment une opération en une autre, comme l'indique par exemple la propriété 1.

Ces homomorphismes jouent un rôle très important en mathématiques et chacun connaît le logarithme qui vérifie $\log(a\times b)=\log(a)+\log(b)$ et qui transforme donc des multiplications en additions (ici, $*_2$ est l'addition habituelle). Avant l'avènement des ordinateurs, c'était le moyen le plus efficace pour mener à la main des calculs numériques, et c'est pourquoi on dressait des tables de logarithmes contenant des millions de données.

En mathématiques, on connaît de nombreux homomorphismes, mais aucun des homomorphismes classiques ne peut servir à concevoir un cryptage $\mathscr{C}$ homomorphe car l'opération de décryptage $\mathscr{C}'$ est alors trop simple ; or une bonne méthode cryptographique est une méthode où il est difficile de trouver $\mathscr{C}'$. Le problème des systèmes de chiffrement pleinement homomorphes n'était donc pas évident au moment où, en 1978, l'idée en a été envisagée par les Américains Ron Rivest et Leonard Adleman et le Grec Michael Dertouzos. On s'est longtemps demandé si de telles méthodes existaient. Le problème a parfois été qualifié de graal de la cryptographie.

Une percée décisive a été réalisée en 2009 par Craig Gentry, de l'université Stanford et aujourd'hui chercheur au centre Thomas Watson d'IBM à New York. Craig Gentry a proposé une méthode qui résout théoriquement le problème et a pour cela reçu une bourse de 625 000 dollars de la fondation MacArthur. La méthode qu'il a initialement proposée n'est pas applicable, car elle exige des calculs trop volumineux au moment du cryptage (la transformation des données avant de les envoyer) et du décryptage. De plus, la taille des données que doit manipuler l'opérateur extérieur $\mathbb{O}$, et donc la quantité de calculs qu'il doit mener, est des millions de fois celle nécessaire quand les données ne sont pas cryptées.

Craig Gentry a fait une percée décisive, pour laquelle il s'est vu attribuer une bourse de 625 000 dollars.

Depuis 2009, une multitude de recherches ont été faites pour trouver des schémas plus économiques. En quelques années, les progrès ont rendu envisageables certaines applications, et l'espoir de méthodes encore plus économiques et faciles à mettre en œuvre suscite de nombreux travaux parmi les spécialistes.

Avant de donner des précisions sur les idées de la percée décisive de Craig Gentry, revenons sur les applications des cryptages pleinement homomorphes ou même partiellement homomorphes.

L'algorithme RSA (conçu en 1977 par Ronald Rivest, Adi Shamir et Leonard Adleman) est une méthode de chiffrement à clef publique : pour crypter un message, on utilise la clef publique de son correspondant, et lui seul peut déchiffrer le message grâce à sa clef secrète. C'est un bon algorithme, aujourd'hui très utilisé. Il a la propriété d'être homomorphe pour la multiplication : on en déduit une méthode de chiffrement homomorphe pour l'addition, comme celle évoquée au début de l'article, méthode ayant cette fois l'avantage que les données sont correctement masquées à l'opérateur extérieur.

Une application : les votes secrets

Avec un système additivement homomorphe de ce type, on peut opérer des votes secrets sur le réseau sans se rencontrer. Décrivons un tel procédé.

Il y a trois types d'intervenants : les votants (au plus $N-1$), l'opérateur calculateur, et l'opérateur de dépouillement. L'opérateur de dépouillement choisit un couple clef publique/clef privée et communique la clef publique à chaque votant. Chaque votant choisit alors un nombre entier V de la forme Nk (k entier) s'il veut voter OUI, ou $Nk+1$ (k entier) s'il veut voter NON ; puis il chiffre le nombre V choisi avec la clef publique et transmet le nombre crypté $\mathscr{C}(V)$ à l'opérateur de calcul. Ce dernier fait la somme S de tous les nombres qu'il reçoit et communique S à l'opérateur de dépouillement, lequel déchiffre le résultat grâce à la clef privée, qu'il est seul à connaître. Il trouve ainsi un nombre de la forme $Mk+p$, où p est le nombre de personnes ayant voté NON. Le résultat du vote est alors communiqué à tous.

L'opérateur calculateur, qui ne connaît pas la clef de déchiffrement, ne peut pas connaître les votes individuels ; l'opérateur de dépouillement, qui n'a pas eu connaissance des nombres transmis individuellement, ne peut pas lui non plus connaître les votes individuels. Les votants peuvent contrôler le travail de l'opérateur de calcul, s'ils acceptent de se communiquer les $\mathcal{C}(V)$, ce qui ne compromet pas le secret du vote. Avec un tel système, même si les votants sont séparés par des milliers de kilomètres et ne communiquent que par messages, aucun vote ne circule de manière lisible, et personne ne sait comment les autres ont voté. On peut encore perfectionner de tels systèmes, comme l'explique un article de Véronique Cortier et Steve Kremer *(voir la bibliographie)*.

Ce type d'applications de la cryptographie partiellement homomorphe est aujourd'hui arrivé à maturité et le système de vote *Helios* est un logiciel libre développé par les chercheurs de l'université Harvard et de l'université catholique de Louvain. On l'a utilisé pour l'élection du recteur de l'université catholique de Louvain et plusieurs fois lors d'élections étudiantes. L'Association internationale des chercheurs en cryptographie (IACR) l'utilise pour choisir les membres de son bureau. Il est fondé sur le système de chiffrement *El Gamal*, qui est additivement homomorphe.

Une arithmétique «secrète»

Voici maintenant la description d'une version du chiffrement pleinement homomorphe de Craig Gentry. Cette version est due à Marten van Dijk, Craig Gentry, Shai Halevi et Vinod Vaikuntanathan. Les idées sont simples et n'impliquent que des calculs élémentaires effectués avec des entiers.

La méthode utilise le fait que, pour créer un système de chiffrement pleinement homomorphe, il suffit de définir un système qui chiffre les bits, des 0 et des 1, et de savoir faire exécuter par l'opérateur extérieur un nombre quelconque d'opérations logiques du type XOR (OU exclusif) et ET entre de tels bits chiffrés.

Vers des machines à voter sûres ?

La question de savoir s'il faut développer l'utilisation de machines à voter est particulièrement délicate, et elle exige que des cryptologues compétents et des techniciens très qualifiés s'en occupent... ce qui n'est pas toujours le cas. [illegible] mouvements. En France, un rapport du Sénat datant de 2014 préconisait le maintien du moratoire sur les machines à voter décidé en 2007. La CNIL a aussi exprimé des réserves sur le vote électronique.

Les incidents et problèmes semblent trop nombreux pour qu'on envisage aujourd'hui de remplacer au niveau national le bulletin de vote, l'isoloir et l'urne fermée à clef par des ordinateurs s'échangeant des messages et que les citoyens devraient manipuler pour effectuer leurs devoirs électoraux.

Le site *Ordinateurs de vote* (www.ordinateurs-de-vote.org/) et le récent rapport *Ethics and electronic voting* de Chantal Enguehard (https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01016256/document) détaillent les raisons et les faits montrant qu'il faut être prudent et patient.

Cependant, rien n'interdit de chercher à concevoir des méthodes de vote aussi rigoureuses que possible, permettant des contrôles *a posteriori* tout en garantissant l'anonymat des votes. Le calcul homomorphe présenté dans le présent article semble une voie sérieuse : il donne des garanties convenables concernant la protection du secret des votes et autorise le contrôle et le recalcul des résultats, tout en permettant à chacun d'être certain que son bulletin est pris en compte.

Le système *Helios* de vote par Internet (https://vote.heliosvoting.org/), fondé sur le calcul homomorphe et développé par l'université Harvard et l'université catholique de Louvain, est disponible gratuitement et librement. L'association internationale des chercheurs en cryptographie (IACR) l'utilise pour choisir les membres de son bureau... ce qui est un argument sérieux pour croire en ses qualités.

Il faut se méfier de toutes les solutions précipitées en la matière, et il ne faut renoncer à aucune des garanties données par les procédures classiques de vote. Il ne fait cependant pas de doute qu'il y aurait des avantages à pouvoir voter de chez soi, et que si c'était possible de manière sûre, le coût de l'organisation d'élections en serait, à terme, considérablement réduit.

MACHINE À VOTER électronique utilisée à Pulnau-sous-Bois en 2007

Calcul flou et *bootstrapping*

Le système de calcul homomorphe initialement conçu par Craig Gentry se fonde sur deux idées que l'on retrouve dans tous les systèmes de calcul

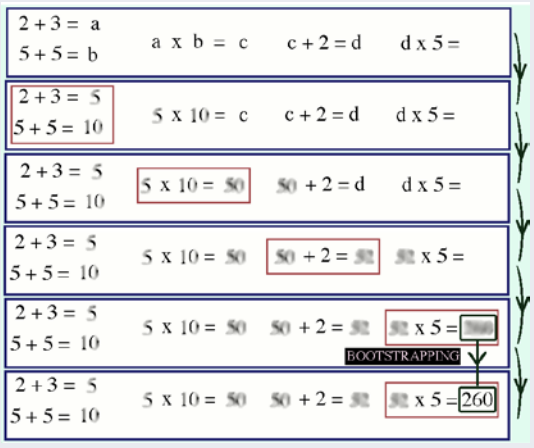
La première idée est que les données doivent être chiffrées d'une manière floue.

Ce flou ne pouvant être effacé que par celui qui connaît la clef de déchiffrement. À mesure que les calculs homomorphes s'effectuent, le flou s'accroît

comme l'illustration ci-dessous le symbolise. Après un certain nombre d'opérations, le flou devient si important que même avec la clef de déchiffre-

ment, il est devenu impossible d'accéder aux résultats.

La seconde idée est qu'en s'y prenant bien (en demandant au système homomorphe d'exécuter l'opération de déchiffrement sur ses données, donc sans en prendre connaissance, et sans prendre connaissance des résultats), on réussit à effacer le flou qui risquait de devenir irrécupérable. C'est le *bootstrapping*, opération miraculeuse analogue à celle du baron de Münchhausen qui s'élevait dans les airs en tirant sur ses bottes. Soigneusement conçu et réalisé, ce nettoyage périodique des données est réellement possible et permet alors de mener des calculs homomorphes sans limitations de complexité : dès que le flou devient trop grand, on le réduit par *bootstrapping*.



La clef secrète du système, que l'utilisateur doit garder pour lui, comme le C de l'exemple du début de l'article, est ici un long nombre entier impair p, mettons de 500 chiffres binaires. Dans toute la description de la méthode, la taille des entiers manipulés est importante ; les opérations ne sont pas faisables à la main, mais ce n'est aujourd'hui pas un problème, puisque n'importe quel téléphone peut manipuler des nombres de plusieurs millions de chiffres.

Un multiple « approximatif » de p est un nombre de la forme $qp + e$, où e est un nombre d'une vingtaine de chiffres binaires introduisant une sorte de bruit. Retrouver p à partir de la donnée d'un ou plusieurs multiples approximatifs de p nécessite des calculs si longs qu'ils sont impossibles à réaliser pratiquement en un temps raisonnable. C'est sur cette impossibilité pratique que se fonde le chiffrement pleinement homomorphe que nous décrivons. Si q comporte beaucoup de chiffres (par exemple plusieurs millions de chiffres binaires), un attaquant ignorant p ne peut pas faire la différence entre $qp + e$ et un nombre quelconque de même taille.

De ce fait, chiffrer un bit b ($b = 0$ ou 1) par $\mathcal{C}(b) = pq + b + 2r$ où r a une vingtaine de chiffres et q plusieurs millions est une bonne méthode : celui qui connaît p n'a aucun mal à retrouver q en faisant la division par p. Le reste de la division est $b + 2r$, qui est pair si $b = 0$ et impair si $b = 1$. Ainsi, celui qui connaît p saura sans mal déchiffrer $\mathcal{C}(b)$. Et celui qui ne connaît pas p ne voit dans $\mathcal{C}(b)$ qu'un nombre quelconque dont il ne tire rien.

Ce système de chiffrement est homomorphe pour le XOR et le ET et est donc pleinement homomorphe. Le vérifier est une simple question d'arithmétique. En voici les détails, que vous pouvez passer si vous trouvez cela fastidieux.

Soient b_1 et b_2 deux bits. Chiffrons-les : $\mathcal{C}(b_1) = c_1 = q_1 p + 2r_1 + b_1$ et $\mathcal{C}(b_2) = c_2 = q_2 p + 2r_2 + b_2$ avec des entiers r_1 et r_2 d'une vingtaine de chiffres, p d'environ 500 chiffres et q_1 et q_2 de plusieurs millions de chiffres. Celui qui connaît p peut calculer le reste de la division par p de :

$$c_1 + c_2 = (q_1 + q_2)p + 2(r_1 + r_2) + (b_1 + b_2).$$

Ce reste est $2(r_1 + r_2) + (b_1 + b_2)$; puisque $2(r_1 + r_2)$ est pair, connaître le reste donne la parité de $(b_1 + b_2)$ c'est-à-dire le XOR entre b_1 et b_2. Additionner $\mathcal{C}(b_1)$ et $\mathcal{C}(b_2)$ donne donc, si l'on connaît p, le XOR entre b_1 et b_2 ($b_1 + b_2$ n'est impair que si l'un ou l'autre est impair, mais pas les deux, et est pair dans les deux autres cas). On peut donc faire calculer à un opérateur extérieur des XOR sans qu'il connaisse ni les données b_1 et b_2, ni le résultat qu'il calcule. C'est la propriété d'homomorphisme additif. Notons que le « bruit » sur $c_1 + c_2$ est passé de r_1 et r_2 à $2(r_1 + r_2)$, il a donc à peu près doublé.

Pour la multiplication, l'opérateur extérieur calcule : $c_1 c_2 =$

$$q_1 q_2 p + 2q_1 r_2 + q_1 b_2 + 2q_2 r_1 + q_2 b_1)p + 2(2r_1 r_2 + r_1 b_2 + r_2 b_1) + b_1 b_2.$$

La division par p donne le reste $2(2r_1 r_2 + r_1 b_2 + r_2 b_1) + b_1 b_2$ et donc la parité de $b_1 b_2$, c'est-à-dire le ET entre b_1 et b_2 ($b_1 b_2$ est impair si b_1 et b_2 le sont). C'est la propriété d'homomorphisme multiplicatif. Notons cependant que le bruit sur le résultat est maintenant de l'ordre de $4 r_1 r_2$.

Nettoyer périodiquement le « bruit »

Cette méthode est donc parfaite à un détail près. Plus on fera de calculs successifs de XOR et de ET, plus le bruit introduit par les $2r$ augmentera en taille et cela en particulier à cause des ET. Ce n'est pas grave si l'on n'effectue que quelques opérations, mais cela devient très ennuyeux si le bruit atteint la taille de p, car alors on ne peut plus retrouver $(b_1 + b_2)$ et $b_1 b_2$.

En effet, si le bruit devient supérieur à p, le reste n'est plus comme il faut (car le quotient augmente de 1 ou plus) pour connaître la somme et le produit des deux bits codés. La méthode n'est bonne qu'à la condition d'opérer un nombre limité d'opérations successives. Pour un calcul dépendant de plusieurs dizaines de bits $b_1, b_2, ..., b_k$ présents dans une expression complexe utilisant beaucoup de XOR et de ET, le résultat obtenu par l'opérateur extérieur risque d'être devenu illisible à celui qui lui a confié le calcul. La méthode sans le perfectionnement qui va venir ne fonctionne qu'avec des calculs assez limités. C'est là qu'intervient la deuxième idée majeure de Craig Gentry. Elle consiste à nettoyer périodiquement le bruit pour éviter qu'il ne devienne trop important.

Pour cela, on fait déchiffrer le résultat du calcul partiel avant qu'il ne soit trop brouillé. Ce nettoyage enlève tout le bruit. On l'effectue en demandant à l'opérateur extérieur d'appliquer la fonction de déchiffrement sur le résultat partiel, c'est-à-dire de diviser par p et examiner la parité du reste obtenu. Suprême astuce : puisqu'on ne fait pas confiance à l'opérateur extérieur, on ne lui communique pas la clef de déchiffrement (le nombre p), mais on lui demande de faire ce déchiffrement par un calcul homomorphe utilisant la méthode qu'on vient de décrire ! Ce n'est possible bien sûr que si ce calcul homomorphe du déchiffrement n'est pas trop complexe, c'est-à-dire n'exige pas, une fois traduit en XOR et en ET, une succession trop longue de calculs : on s'en assurera.

Cela semble assez fou et cela ressemble à l'opération consistant à s'élever dans les airs en tirant sur ses bottes… c'est d'ailleurs pourquoi le nom donné à cette phase du calcul est *bootstrapping*. Pour que la phase de *bootstrapping* soit possible, il faut qu'un minimum d'opérations soient faisables sans que le bruit qui s'introduit soit devenu trop grand, et cela oblige à prendre des nombres entiers très longs pour p et les q_i, mais cela marche, et on dispose donc d'une méthode de calcul pleinement homomorphe comme on en rêvait. L'opération de *bootstrapping*, en nettoyant autant de fois que nécessaire les calculs partiels, rend possible des séries d'opérations aussi longues qu'on le souhaite de XOR et de ET ; et on peut donc faire exécuter tout calcul par un opérateur extérieur qui ignorera ce qu'il calcule.

Puisque la taille des bits chiffrés $\mathcal{C}(b)$ est nécessairement grande, les calculs effectués par l'opérateur extérieur sont très lourds, énormes comparés à ce qu'il faudrait faire si on ne souhaitait rien cacher, mais le but est atteint : on sait déléguer des calculs sans dévoiler ni les données ni le résultat.

Encore quelques ordres de grandeur à gagner

Les travaux très nombreux sur ce sujet menés depuis 2009 ont visé à réduire les surcoûts en taille et en lourdeur de calcul des systèmes homomorphes. On progresse et des réalisations logicielles utilisant les idées mathématiques de ces travaux tentent de rendre les systèmes utilisables en pratique. La série d'opérations nécessaires au chiffrement de données par l'algorithme AES (*Advanced Encryption Standard*), très largement utilisé dans le monde entier, sert de repère pour mesurer les progrès des différents programmes de chiffrement homomorphe. On est ainsi passé, pour l'exécution de ce calcul test par un système homomorphe, de plusieurs heures (sur une machine courante) à quelques secondes.

C'est remarquable, mais pour que réellement on puisse envisager de confier massivement les calculs qu'on veut faire sur des données confidentielles à des opérateurs extérieurs qui les exécuteraient sans rien y voir, il faudra encore attendre un long moment, que le surcoût ait diminué de plusieurs ordres de grandeur.

Certains experts tels que l'Américain Bruce Schneier restent réservés tant les surcoûts sont encore élevés. Aujourd'hui, la formidable idée de la cryptographie homomorphe est utile, par exemple pour la conception de systèmes de vote. Cependant, malgré une série d'idées intéressantes qui ont prouvé qu'elle était possible dans sa forme la plus générale, sa mise en œuvre pour tous, permettant plus de sécurité et une meilleure confidentialité sur les réseaux, devra encore attendre un peu. ■

L'AUTEUR

J.-P. DELAHAYE est professeur émérite à l'Université de Lille et chercheur au Centre de recherche en informatique, signal et automatique de Lille (CRISTAL).

BIBLIOGRAPHIE

K. Yi *et al.*, **Homomorphic Encryption and Applications**, Springer, 2014.

V. Cortier et S. Kremer, **Vote par internet**, *Interstices*, 2013 (https://interstices.info/jcms/int_68258/vote-par-internet).

M. Van Dijk *et al.*, **Fully homomorphic encryption over the integers**, *Advances in Cryptology - EUROCRYPT 2010*, Springer, pp. 24-43, 2010.

C. Gentry, **Fully homomorphic encryption using ideal lattices**, *Proceedings of the 41st ACM Symposium on Theory of Computing*, pp. 169-178, 2009.

R. Rivest *et al.*, **On data banks and privacy homomorphisms**, *Foundations of Secure Computation*, Academic Press, pp. 169-180, 1978.

Retrouvez la rubrique Logique & calcul sur www.pourlascience.fr

SCIENCE & FICTION

La Force des Jedi, une question de puissance

Quand on s'interroge sur la puissance que doivent maîtriser les chevaliers Jedi pour utiliser la Force, on comprend que les élus soient peu nombreux.

Roland LEHOUCQ et Jean-Sébastien STEYER

Dans la saga *Star Wars*, la Force est la mystérieuse source du pouvoir des chevaliers Jedi. Dans l'épisode IV, *Un nouvel espoir*, Obi-Wan Kenobi explique que la Force est « un champ d'énergie créé par tous les êtres vivants. Il nous entoure et nous pénètre. Il lie la galaxie tout entière ». Bien que force et énergie soient des notions différentes en physique, cette définition implique que la Force est un réservoir d'énergie dans lequel les Jedi peuvent puiser à volonté. Comme l'énergie mesure la capacité d'un système à effectuer des transformations, on comprend que, pour réaliser leurs exploits, les Jedi en utilisent beaucoup.

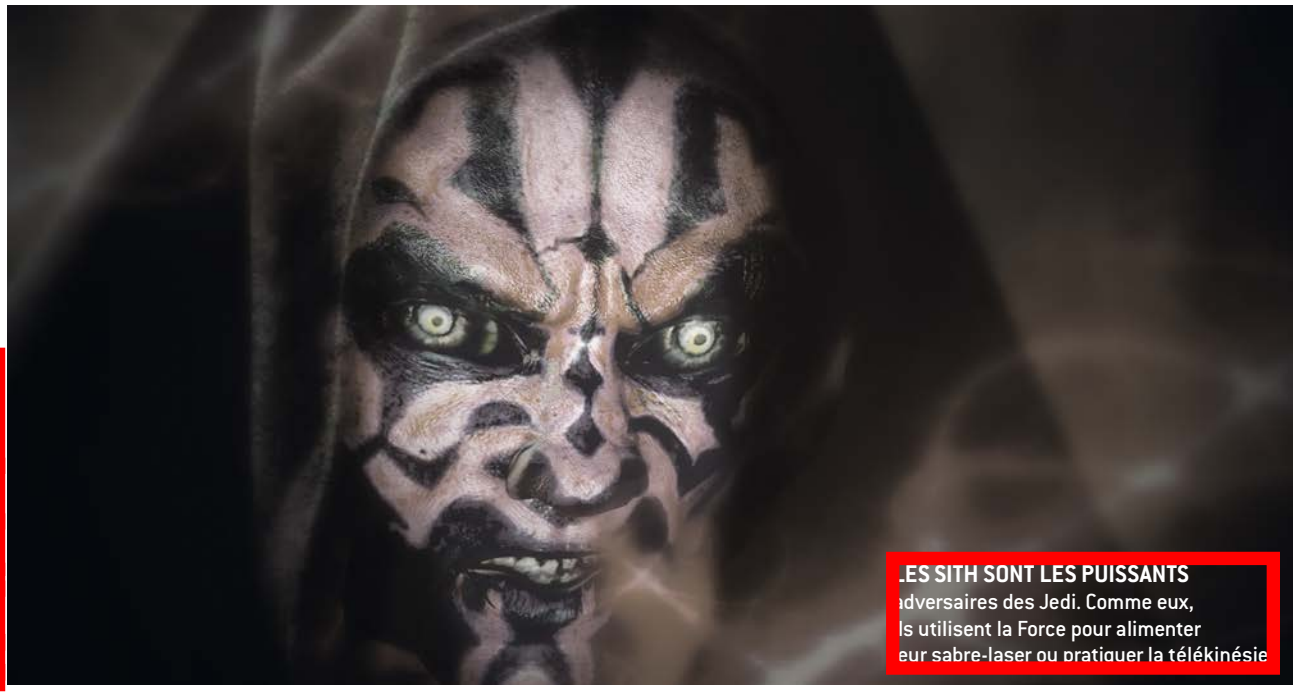
La Force doit donc être un grand réservoir d'énergie, mais il n'est pas suffisant d'avoir accès à celle-ci, il faut aussi pouvoir l'extraire à un rythme suffisant. Autrement dit, c'est une question de puissance. Les Jedi en produisent-ils assez ? On peut quantifier cette puissance grâce aux films de la saga.

Commençons par examiner le cas de maître Yoda. Il apparaît pour la première fois à l'écran en 1980 dans l'épisode V, *L'Empire contre-attaque*. Il vit alors reclus sur la planète Dagobah et fait une démonstration de la Force en sortant le vaisseau *X-Wing* de Luke Skywalker du marais dans lequel il vient de sombrer. Quelle puissance le maître Jedi doit-il produire pour réaliser cet exploit ? Si l'on suppose qu'un *X-Wing* a les dimensions d'un avion de combat tel que le *Rafale*, il doit faire une quinzaine de mètres de long pour une masse d'au moins 25 tonnes à pleine charge. Yoda extrait le vaisseau du marais assez lentement, à une vitesse que l'on peut estimer à une cinquantaine de centimètres par seconde. Si la gravité de Dagobah est voisine de celle de la Terre, la puissance nécessaire pour réaliser cet exploit est d'au moins 100 kilowatts, soit la puissance d'une voiture ordinaire ! Par comparaison, quand Luke Skywalker s'entraîne en soulevant le droïde R2D2, qui doit peser une centaine de kilogrammes, de un mètre en environ une seconde, il fournit une puissance de seulement 1 kilowatt.

La Force est un réservoir d'énergie dans lequel les Jedi peuvent puiser à volonté.

Si Yoda est capable de bien d'autres exploits, c'est l'empereur Palpatine qui impressionne par son utilisation de la Force. Une scène de l'épisode VI, *Le Retour du Jedi*, nous permet de quantifier la puissance qu'il est capable de produire. Palpatine tente de convaincre Luke Skywalker de le rejoindre du côté obscur de la Force. Devant la résistance de ce dernier, il le torture, puis tente de le tuer en le frappant avec des éclairs émis par les extrémités de ses doigts. Alors que Yoda utilisait la Force de façon « antigravitationnelle », l'empereur fait appel à celle-ci pour se transformer en un puissant générateur de tension.

Les éclairs qui illuminent le ciel durant un orage résultent aussi de la grande différence de potentiel électrique entre le nuage



LES SITH SONT LES PUISSANTS
adversaires des Jedi. Comme eux,
ls utilisent la Force pour alimenter
eur sabre-laser ou pratiquer la télékinésie

et le sol. Sous l'action du champ électrique qui en résulte, les molécules de l'air sont brisées, libérant ainsi des atomes d'oxygène et d'azote, principaux constituants de notre atmosphère. Si le champ électrique est assez intense, certains des électrons de ces atomes sont arrachés. L'air, un isolant électrique dans des conditions normales, devient alors conducteur et un éclair frappe le sol. Le champ électrique nécessaire pour produire ce phénomène d'ionisation de l'air est de l'ordre de 3,6 millions de volts par mètre pour de l'air sec à la pression atmosphérique.

L'empereur, une vraie locomotive

Si l'on estime que les éclairs produits par l'empereur ont une longueur de 3 à 4 mètres, tout se passe comme s'il était branché à un générateur d'une dizaine de millions de volts, à comparer aux 100 millions de volts mis en jeu dans la foudre. Pour évaluer la puissance produite par Palpatine, il faut aussi estimer l'intensité du courant qui circule dans l'éclair. Le seuil de perception d'un courant électrique par le corps humain est d'environ 2 milliampères. Des courants jusqu'à 300 milliampères passant à travers le corps durant plusieurs minutes peuvent provoquer des arythmies cardiaques réversibles, des marques visibles, des brûlures, des vertiges, voire une perte de connaissance. Au-dessus de 300 milliampères, le sujet perd connaissance. Si l'on suppose que l'empereur commence par une valeur « raisonnable » mais déjà très désagréable de l'ordre de 200 milliampères pour faire souffrir Luke, il produit une puissance de 2 mégawatts ! Et s'il s'énerve un peu pour atteindre une intensité de l'ordre de l'ampère, c'est plutôt 10 mégawatts que Palpatine est capable de produire, soit la puissance consommée par la locomotive d'un TGV Duplex !

Le sabre-laser est aussi un objet emblématique de la saga *Star Wars*. Au vu des dégâts que ces sabres peuvent causer, la question de la puissance qu'ils dégagent se pose aussi. Déterminons la puissance d'un sabre-laser en analysant la scène d'introduction de l'épisode I, *La Menace fantôme* (1999). On y voit Qui-Gon Jinn tenter de franchir une épaisse porte blindée. Pour cela, Qui-Gon plonge son sabre-laser dans la porte métallique, ce qui la chauffe intensément et finit par en fondre une partie.

Pour déterminer la puissance dégagée par le sabre-laser de Qui-Gon, il suffit d'estimer l'énergie nécessaire pour faire fondre la porte et de la diviser par la durée – de l'ordre de quelques secondes – mise pour y parvenir. L'énergie nécessaire dépend de la masse de métal à faire fondre et de ses propriétés thermodynamiques.

Faute d'information sur la nature du métal, supposons qu'il s'agisse d'acier. Tout autre métal ferait l'affaire, même si ses propriétés différentes modifient un peu la valeur numérique de notre réponse. Si la porte est en acier, sa masse volumique avoisine les 8 tonnes par mètre cube. Supposons que le volume fondu soit un cylindre d'environ 1 mètre de diamètre et d'une épaisseur de près de 60 centimètres, à l'image des portes des coffres du dépôt d'or de Fort Knox. Cela correspond alors à environ 4 tonnes d'acier. Pour faire fondre cette masse, il faut porter le métal de la température ambiante à sa température de fusion, puis payer le coût énergétique de la fusion elle-même. Le résultat du calcul est sans appel : il faut que le sabre-laser dégage au bas mot 1 gigawatt, soit la puissance d'un réacteur nucléaire !

Si le sabre-laser fonctionne avec une batterie, il faut que celle-ci soit capable de stocker une quantité considérable d'énergie. Et quand on voit l'autonomie des téléphones portables, qui font hélas des choses nettement moins ambitieuses qu'un sabre-laser, on se demande s'il existe vraiment une batterie suffisamment compacte capable d'en alimenter un digne de ce nom. En fait, la densité d'énergie d'un sabre-laser (le rapport entre l'énergie qu'il contient et la masse de sa batterie) est si élevée que la batterie serait réduite à ses constituants atomiques simplement en la chargeant ! Cela confirme que c'est bien en puisant dans l'énergie de la Force que les Jedi parviennent à utiliser leur sabre-laser et que seuls eux peuvent le faire efficacement. La maîtrise de la Force n'est pas à la portée de tout le monde. ■

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

ART & SCIENCE

Le mystère de la pastèque blanche

Dans une nature morte italienne du XVII^e siècle, une pastèque coupée montre une chair essentiellement blanche. Pourquoi ? Pour le savoir, retraçons l'épopée de ce fruit, régal des anges, de la tombe de Toutânkhamon jusqu'au Japon actuel.

Loïc MANGIN

L'été est déjà loin, mais vous vous souvenez encore de Céline, de Catherine, d'Alana et de celle qu'on appelle Sugar Baby… Ne vous méprenez pas, il ne s'agit pas de vos conquêtes estivales, mais de variétés de… pastèques (*Citrullus lanatus*). Cette cucurbitacée est l'un des fruits les plus rafraîchissants qui soient et Mark Twain fait dire à son héros de *La Tragédie de Pudd'nhead Wilson* que la pastèque est « le roi, par la grâce de Dieu, de tous les fruits de la création. En avoir goûté, c'est savoir ce que mangent les anges ».

Un tel luxe ne pouvait mériter que les honneurs des peintres et, de fait, on trouve plusieurs représentations de la pastèque, par exemple dans une nature morte du Flamand Abraham Brueghel (1631-1690), ou bien dans une œuvre de l'Italien Giovanni Stanchi (1608-1675). Dans cette dernière (*voir page ci-contre*), on distingue bien au moins deux pastèques, mais elles ne ressemblent guère à celles de votre été. Certes, parmi les variétés actuelles, on en trouve à chair rouge bien sûr, jaune, verte ou couleur crème, mais là, le cœur du fruit est surtout blanc et un peu rouge. Comment l'expliquer ?

Les anges peuvent se délecter de la pastèque – le roi de tous les fruits – depuis au moins 5 000 ans.

James Nienhuis, agronome à l'Université du Wisconsin, s'est intéressé au problème. D'abord, rappelons que l'essentiel de la chair d'une pastèque est le placenta hypertrophié où sont nichées les graines, le placenta reliant les ovules (avant fécondation) dans l'ovaire de la plante. Selon James Nienhuis, les pastèques actuelles résultent de sélections opérées par les cultivateurs de façon à obtenir un enrichissement en lycopène (un pigment rouge que l'on trouve aussi dans les tomates), et donc une chair bien rouge.

Pourtant, la pastèque qui apparaît dans la nature morte de Brueghel, peinte à la même époque que celle de Stanchi, est bel et bien rouge. La pastèque de l'Italien ne serait-elle pas mûre ? Si, la présence de graines noires est sans équivoque : le fruit a bien été cueilli à maturité.

Cette diversité illustrerait le processus de sélection en cours à cette époque pour l'obtention de la pastèque idéale. Il se poursuit aujourd'hui ; en témoignent les nouvelles variétés « sans pépins » (ou plutôt à pépins atrophiés) que l'on trouve dans nos commerces. Cette caractéristique résulte d'une triploïdie (les plants ont trois jeux de chromosomes au lieu de deux). La pastèque noire Densuke, qui ne pousse que dans le nord de l'île d'Hokkaido, au Japon, est aussi une variété récente. Sa rareté et son goût font qu'elle s'arrache à prix d'or : plusieurs milliers d'euros par spécimen !

Si la pastèque a conquis le monde (on en produit quelque 100 millions de tonnes

LA PASTÈQUE de Giovanni Stanchi, peintre italien du XVII^e siècle, est intriguante : pourquoi ne ressemble-t-elle pas à celle que nous dégustons l'été ?

par an), on sait peu de choses sur son origine. En d'autres termes, la question est de savoir depuis combien de temps les anges mangent de la pastèque. À en croire les travaux de Harry Paris, du centre de recherches Newe Ya'ar, en Israël, ils peuvent s'en délecter depuis au moins 5 000 ans. En réunissant tous les traces historiques, il est parvenu à reconstituer l'épopée de la pastèque.

Les plus anciens vestiges archéologiques, des graines, ont été découverts en Libye. On a aussi trouvé des graines, ainsi que des représentations picturales, dans des tombes égyptiennes (dont celle de Toutânkhamon) datant pour certaines de 4 000 ans. Etonnamment, l'une des images montre un fruit oblong, semblable à ceux d'aujourd'hui, et distinct des variétés sauvages, plutôt sphériques et par ailleurs au goût amer. Les Égyptiens cultivaient donc des pastèques.

La capacité de stockage de l'eau était un atout dans ces régions sèches. Sans doute est-ce cela qui explique leur présence dans les tombes, les morts ayant besoin de se désaltérer durant leur long voyage. De tous ces témoignages, Harry Paris déduit que la pastèque est apparue dans le nord-est de l'Afrique, où elle a été domestiquée.

Des écrits révèlent que la pastèque a ensuite quitté sa région d'origine pour s'étendre autour de la Méditerranée. Dans son *Histoire naturelle*, au I^er^ siècle, Pline l'Ancien en vante les qualités réfrigérantes. Les médecins Dioscoride et Hippocrate ont également loué ses vertus curatives.

Prudence tout de même : on se souvient qu'en 2011, en Chine, trop dopées au forchlorfenuron, un engrais, des centaines de pastèques ont... explosé ! ■

H. Paris, **Origin and emergence of the sweet dessert watermelon, *Citrullus lanatus***, *Annals of Botany*, vol. 116(2), pp. 133-148, août 2015

CHAQUE MOIS

CHAQUE TRIMESTRE

Retrouvez vos magazines en kiosque ou directement chez vous

POUR LA SCIENCE

La référence de l'actualité scientifique internationale

LES VERSIONS NUMÉRIQUES
Feuilletables en PDF sur le site

L'APPLICATION
Téléchargeable sur Appstore et Google Play pour consulter vos magazines

DES CONTENUS INÉDITS
sur le site

Suivez *Pour la Science* également sur :

WWW.POURLASCIENCE.FR

IDÉES DE PHYSIQUE

L'escalier chantant de Maoshan

Un bruit émis face à des marches d'escalier ou une autre structure périodique peut devenir un son d'une hauteur bien déterminée.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

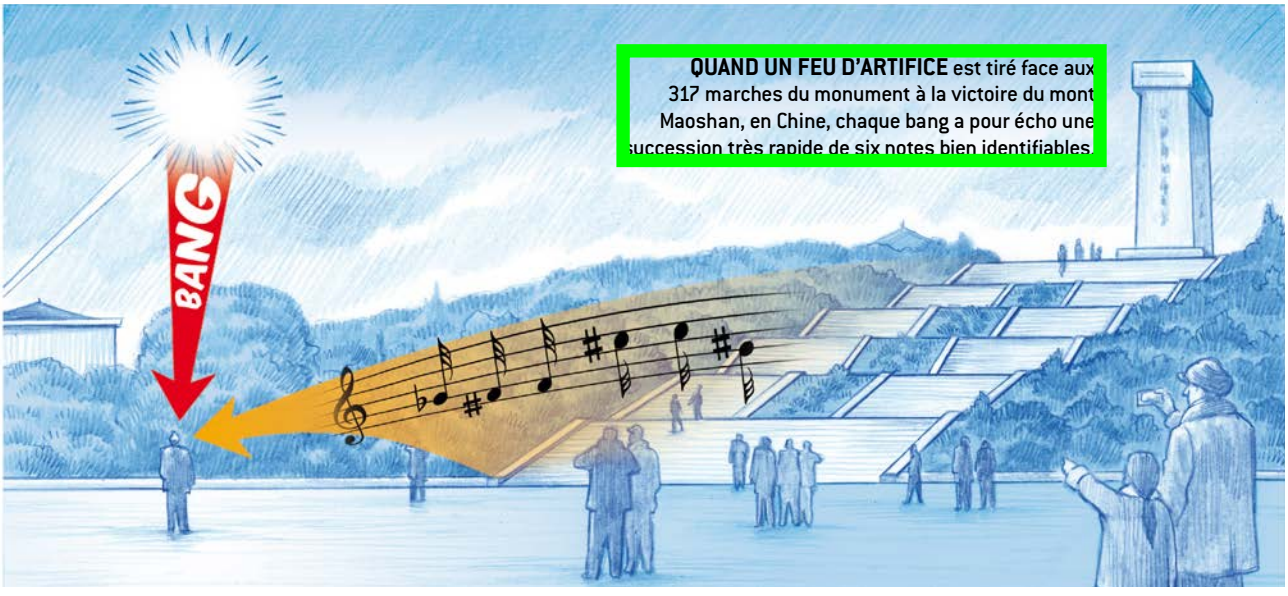
Un visiteur est debout devant l'escalier du monument à la victoire du mont Maoshan, dans la province du Jiangsu, en Chine. Un feu d'artifice est tiré au-dessus de lui. En écho de chaque explosion, le visiteur entend distinctement le son cuivré d'un clairon jouer une brève mélodie de six notes *(voir la figure ci-dessous)*.

On retrouve ce phénomène sous diverses formes au théâtre grec d'Épidaure ou à la pyramide de Kukulcán sur le site maya de Chichén Itzá, au Mexique. Ces architectures ont toutes en commun de présenter des structures périodiques, escaliers ou rangées de sièges, dont les multiples échos s'additionnent pour produire des notes musicales. Comment peut-on l'expliquer ?

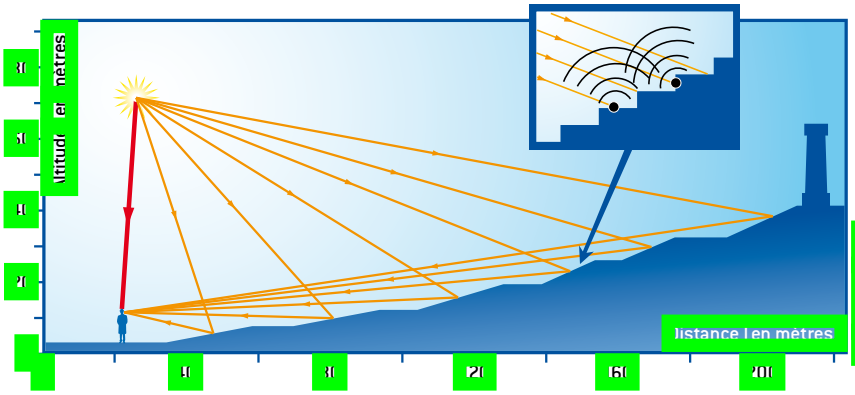
Quand l'écho donne une hauteur à un bruit

Avant de nous attaquer à la mélodie du mont Maoshan, commençons par un phénomène plus simple, constaté dès 1693 par le physicien néerlandais Christiaan Huygens devant l'escalier de pierre du château de Chantilly, en France. Quand la fontaine face à l'escalier fonctionnait, Huygens entendait un son de même hauteur que celui produit en soufflant dans un tuyau de même longueur que la profondeur des marches, soit presque 46 centimètres.

L'effet est toujours présent aujourd'hui, comme un claquement de mains face à l'escalier du château vous le révélera. Chacune des marches renvoie un faible écho de ce claquement, mais notre cerveau interprète la succession rapide de ces échos comme un signal périodique. La période de ce son correspond au temps de trajet supplémentaire pour passer d'une marche à la suivante, c'est-à-dire à la durée que met le son pour parcourir deux fois la largeur d'une marche, ici 2,7 millisecondes. À partir d'un bruit, claquement de mains ou clapotis d'une fontaine, nous



QUAND UN FEU D'ARTIFICE est tiré face aux 317 marches du monument à la victoire du mont Maoshan, en Chine, chaque bang a pour écho une succession très rapide de six notes bien identifiables.



LES MARCHES DU MONUMENT

Du mont Maoshan réfléchissent différemment selon leurs caractéristiques (hauteur, profondeur et position) et la longueur d'onde acoustique, les ondes sonores qui forment le bang initial – et cela en chacun de leurs points *(cartouche)*. L'écho est la somme de toutes les ondes réfléchies. Le calcul confirme que cette somme est perçue comme une succession rapide de six notes, liées aux six volées dont est constitué l'escalier.

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.idphus.f

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

écoltons un son périodique, c'est-à-dire une note de musique, dont la fréquence, l'inverse de la période, est ici de 370 hertz.

Cet effet est plus spectaculaire avec l'escalier de la pyramide de Kukulcán où l'écho du claquement de mains imite, dit-on, le gazouillis du quetzal. Il y a une dizaine d'années, le physicien néerlandais Frans Bilsen a intégré dans ses calculs les grandes dimensions de la pyramide pour tenir compte du fait que, à mesure que la position des marches augmente, l'inclinaison des ondes réfléchies par rapport au sol augmente aussi et, avec elle, le délai entre deux ondes successives. Ainsi, les premières ondes réfléchies reçues par l'auditeur proviennent du bas de la pyramide et sont séparées par les durées les plus courtes ; elles sonnent plus aiguës que les ondes plus tardives réfléchies par le haut de l'escalier. On a ainsi un effet de *alissando* marqué.

En fait, de façon surprenante, il suffit d'une seule réflexion pour que notre cerveau attribue une hauteur à un son, même si ce dernier en est dépourvu. Il suffit que notre oreille reçoive successivement et sans recouvrement, dans un laps de temps très court, le signal acoustique et ce même signal renvoyé par une surface acoustiquement réfléchissante. Contrairement à une situation d'écho où l'oreille arrive à discriminer le signal original et le signal réfléchi, l'écart entre les deux est suffisamment bref (en deçà de quelques centièmes de seconde) pour que l'oreille entende un seul signal, mais ce dernier est comme « coloré » par un son dont la fréquence caractéristique est l'inverse du délai de réception entre les signaux.

Ce phénomène serait à l'origine des sons curieux que l'on entend parfois dans les parkings ou du léger *alissando* que l'on perçoit lorsqu'un avion nous survole et que le bruit original est bien réfléchi sur une chaussée ou un mur en béton.

Ces considérations permettent-elles de comprendre l'origine de la mélodie du mont Maoshan ? Qualitativement, oui : la grande longueur de l'escalier (200 mètres, pour 36 de hauteur) explique que les réflexions par les différentes marches s'étendent sur une durée de près d'une seconde, tandis que l'échelonnement de l'escalier en six volées de dimensions différentes explique la succession de six notes de musique bien identifiables.

Quantitativement, toutefois, on est loin du compte, car la durée du bang d'un feu d'artifice (40 millisecondes) est bien plus longue que l'intervalle des réflexions entre deux marches successives : les échos d'au moins une dizaine de marches successives se recouvrent alors et peuvent interférer. Il faut aussi tenir compte d'autres conséquences de la nature ondulatoire du son, notamment la diffraction. Elle est notable lorsque les objets qui réfléchissent ou diffusent les ondes ont des tailles de l'ordre des longueurs d'onde présentes dans les signaux, comme c'est le cas ici (les marches d'escalier ont des tailles correspondant à des sons de quelques centaines de hertz).

Un escalier formant un réseau acoustique

On s'attend ainsi à ce que les ondes acoustiques ne soient pas simplement réfléchies comme une balle sur un mur lisse, mais largement diffractées dans toutes les directions. Xu Chen et ses collègues, à l'université de Nankin, se sont récemment intéressés au phénomène. Ils sont revenus aux sources de la physique ondulatoire et ont appliqué le principe dit de Huygens-Fresnel.

Il s'agit d'abord de décomposer le bang de l'explosion en sons purs de fréquences bien définies. Le résultat est une superposition d'une multitude d'ondes de fréquences différentes sans qu'aucune ne soit caractéristique : notre oreille a donc du mal à lui associer une hauteur, comme face à un vrombissement de moteur, le froissement d'une feuille ou un claquement. Pour chacun de ces sons purs incidents, chaque élément de la surface de l'escalier réémet dans toutes les directions une

onde sonore sphérique de même fréquence et de même amplitude (en négligeant ce qui est transmis dans la pierre). On examine alors la somme des ondes élémentaires, sur toutes les fréquences présentes dans le bang et sur le monument tout entier, que l'auditeur récolte.

Le calcul est fastidieux, mais ne pose pas de problèmes particuliers. Que montre-t-il ? D'abord, que les volées d'escalier contribuent chacune à un son particulier. Comme elles sont bien échelonnées, les sons résultants sont reçus successivement par l'auditeur, avec des écarts de 0,2 seconde environ ; l'oreille les distingue donc bien, d'où la perception d'une brève mélodie.

Ensuite, la hauteur de chacun des six sons est parfaitement déterminée et dépend à la fois des caractéristiques des marches de la volée (hauteur et profondeur) et des positions de la volée, de la source sonore et de l'auditeur. Cette sélectivité en fréquence résulte de l'interférence des ondes réfléchies par les différentes marches de la volée (une cinquantaine au total) : seules certaines fréquences donnent lieu à des interférences constructives et subsistent, les autres disparaissent. C'est l'analogue acoustique de l'irisation que l'on peut observer lorsqu'on éclaire un CD avec de la lumière blanche ; le réseau optique constitué par les traits de la gravure ne renvoie dans une direction donnée que certaines couleurs du spectre.

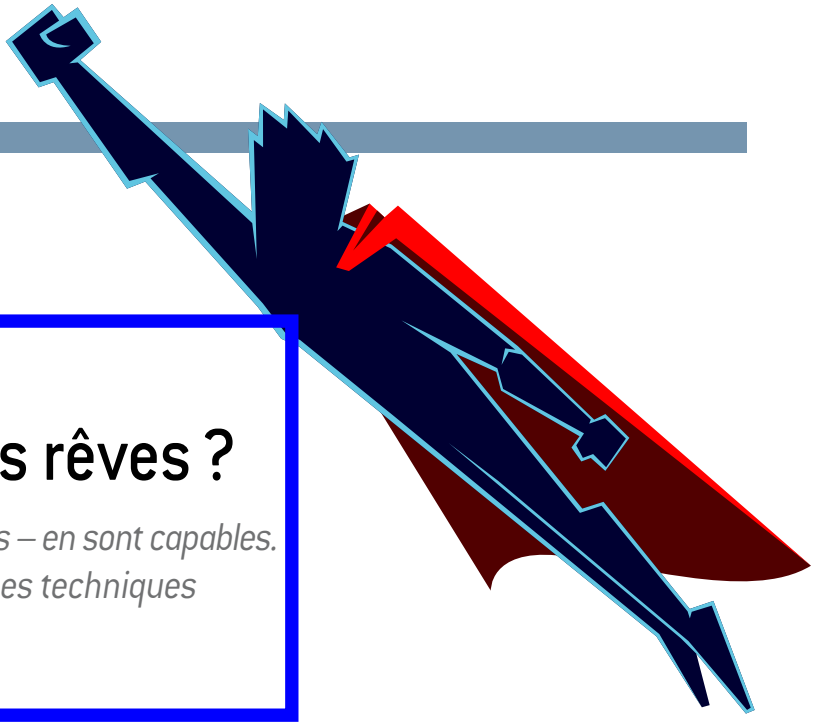
Quantitativement, l'accord entre théorie et mesures expérimentales semble excellent. Les chercheurs, prudents, aimeraient vérifier leur travail sur des monuments similaires, tel le mausolée de Sun Yat-sen (1866-1925), mais ils n'ont pas obtenu les autorisations nécessaires. Alors pourquoi pas un petit feu d'artifice face à l'escalier du château de Chantilly ? ■

BIBLIOGRAPHIE

- X. Chen *et al.*, **Unraveling the mystery of the "Maoshan bugle"**, *American Journal of Physics*, vol. 82, pp. 135-141, 2014.
- E. A. Bilsen, **Huygens on pitch perception ; staircase reflections reconsidered**, *NAG-Journaal*, n° 178, mars 2006.

SUR LE WEB

- **Feux d'artifice au mont Maoshan, avec le son :** www.youtube.com/watch?v=uLfuplZz0L0
- **Écho de la pyramide de Kukulcán :** www.youtube.com/watch?v=WaLRMq8sgYM



QUESTION AUX EXPERTS

Peut-on contrôler ses rêves ?

Nombre de personnes – peut-être toutes – en sont capables. Si vous n'y êtes jamais parvenu, certaines techniques permettent de s'y exercer.

Daniel ERLACHER

Vous êtes assis en haut d'un escalier. Vous pensez qu'il serait tout de même plus pratique de le descendre en volant et… vous commencez à vous élever dans les airs ! Enchaînez-vous quelques loopings comme si de rien n'était ou une petite alarme cérébrale vous suggère-t-elle qu'il s'agit d'un rêve ?

Dans le second cas, vous expérimentez un rêve lucide, c'est-à-dire que vous avez conscience d'être en train de rêver. Parfois, le rêveur prend même le contrôle du rêve – il se met à y agir délibérément – ou décide de se réveiller. Les enquêtes révèlent que ce phénomène est répandu : selon les nationalités et les échantillons statistiques, entre 26 % et 82 % des participants déclarent avoir expérimenté le rêve lucide au moins une fois dans leur vie. Mais pour la majorité d'entre eux, cela reste rare : au maximum quelques pourcents ont un rêve lucide plusieurs fois par semaine.

Le rêve lucide s'apprend-il ? Il est en tout cas possible d'augmenter sa fréquence en appliquant certaines techniques. En revanche, il est difficile de savoir si tout le monde peut y arriver. Certains participants aux études échouent, mais cela ne signifie pas qu'ils n'auront jamais de rêve lucide. Peut-être qu'ils n'ont juste pas eu assez de temps, qu'ils n'étaient pas assez motivés ou que d'autres techniques fonctionneraient sur eux.

Une pléthore de techniques ont été proposées et certaines ont été rigoureusement testées en laboratoire. Celle dont l'efficacité a recueilli le plus de preuves expérimentales est la technique MILD (pour *Mnemonic Induction of Lucid Dreams*, « induction mnémonique de rêves lucides »), proposée vers 1980 par le psychophysiologiste américain Stephen LaBerge. Cette technique est fondée sur un entraînement de la mémoire dite prospective : il s'agit de la capacité à ne pas oublier d'effectuer telle ou telle action dans le futur – par exemple donner un livre à un ami quand on le voit. Le plus souvent, un élément déclencheur (« je vois mon ami ») nous rappelle ce qu'on doit faire (« je lui donne ce livre »).

Le chemin du rêve lucide

La technique MILD doit être pratiquée en sortant d'un rêve, avant de se rendormir. À ce moment, répétez-vous à vous-même : « La prochaine fois que je rêve, je veux me rappeler d'en prendre conscience ». Dans le même temps, revivez mentalement votre rêve (ou un autre rêve récent) en vous imaginant qu'à l'intérieur, vous devenez conscient que ce n'est pas la réalité. Choisissez en outre un élément assez incongru pour révéler qu'il s'agit d'un rêve et dès qu'il survient dans votre projection mentale, pensez : « je suis en train de rêver » ; cet élément servira de déclencheur lorsque vous serez effectivement retourné au pays des songes. Plus généralement, vous vous habituerez ainsi à exercer un regard critique sur vos pensées.

Vous pouvez même vous entraîner à prendre le contrôle de votre rêve. Vous avez envie de voler ? Quand vous vous remémorez votre rêve, imaginez-vous en train de décoller. Vous augmenterez ainsi la probabilité de prendre votre envol dans votre prochain rêve.

Dans notre laboratoire, nous avons testé une version « optimisée » de la technique MILD sur des participants qui n'avaient jamais eu de rêve lucide, ou très rarement (une fois par an maximum) : après environ six heures de sommeil, le sujet devait rester éveillé pendant une heure tout en pratiquant la technique, avant de se rendormir pour deux ou trois heures. Environ la moitié des participants ont réussi à avoir un rêve lucide dès le premier essai.

D'autres méthodes ont fait leurs preuves : la technique réflexive, par exemple, consiste à interrompre régulièrement ses activités pendant la journée, pour se demander si l'on est bien éveillé ou si l'on est en train de rêver. Là encore, on exerce ainsi son regard critique sur ses pensées. Personnellement, c'est la première technique que j'ai pratiquée ; elle m'a permis d'avoir un rêve lucide en deux mois.

Quelle que soit la méthode, certains réussissent du premier coup, tandis que d'autres ont besoin de multiples séances. En outre, quand on cesse de s'exercer, la fréquence du rêve lucide revient au niveau initial. C'est un peu comme dans un marathon : chacun a ses propres prédispositions et doit s'entraîner plus ou moins intensément. Mais peut-être qu'en fin de compte, avec de la persévérance, tout le monde peut y parvenir. ■

Daniel ERLACHER est chercheur à l'université de Berne, en Suisse.

LE FORUM DU CNRS

Que reste-t-il à découvrir ?

PARIS, LA SORBONNE
13 ET 14 NOVEMBRE 2015

CHANGEMENTS CLIMATIQUES

CENT CHERCHEURS VOUS RÉPONDENT

#ForumCNRS
eforum.cnrs.fr

EN ASSOCIATION AVEC Le Monde

cnrs
www.cnrs.fr

PARIS2015 LA RECHERCHE SE MOBILISE POUR LE CLIMAT

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

MAIRIE DE PARIS

AIR LIQUIDE Creative Oxygen

SUEZ environnement

POUR LA SCIENCE

EDF

SAFRAN

casden BANQUE POPULAIRE

SAINT-GOBAIN

SOLVAY

LVMH RECHERCHE PARFUMS & COSMÉTIQUES

SCIENCE & GASTRONOMIE

Dater du vin sans ouvrir la bouteille

Une méthode prometteuse est fondée sur le dosage du carbone 14 des vapeurs extraites à travers le bouchon.

Hervé THIS

Comment être certain que le vin à l'intérieur d'un flacon vénérable est bien celui indiqué sur l'étiquette ? La fraude a augmenté avec la récente hausse de la demande et des prix (14 000 euros pour une bouteille de Richebourg !), et l'on estime que 5 % du vin vieux vendu est frauduleux.

Jusqu'à présent, la détection des fraudes imposait d'ouvrir les bouteilles et d'analyser le liquide. En 1981, en vue de détecter l'ajout de sucre dans les vins (chaptalisation), Gérard Martin et son équipe de l'université de Nantes ont mis au point la méthode RMN-FINS, qui utilise la spectroscopie par résonance magnétique nucléaire (RMN) pour déterminer le rapport des abondances du deutérium et de l'hydrogène : selon le lieu de culture, l'année (avec des climats différents), etc., l'hydrogène et son isotope le deutérium ont des abondances différentes, de sorte que l'on peut déterminer la quantité de sucre ajouté à un moût pour augmenter la teneur en alcool.

La méthode a été étendue aux isotopes de l'oxygène et du carbone, et le centre de contrôle de la Communauté européenne dispose aujourd'hui de plus de 1 400 empreintes de vins représentatifs du vignoble européen.

Toutefois, la méthode d'analyse par spectroscopie RMN a l'inconvénient de perturber le liquide qui, surtout quand il est vieux, est sensible à l'ouverture de la bouteille, en raison notamment des oxydations. Les chimistes analyticiens se sont donc mis en quête de méthodes non invasives.

On a ainsi cherché à distinguer les vins des ères pré- ou post-atomiques à partir de l'émission gamma de leurs radionucléides d'origine anthropique (notamment le césium 137), mais la répartition très variable de cet isotope, dans le temps et dans l'espace, complique l'authentification.

L'étude des vapeurs qui surmontent le vin a le double avantage de ne pas nécessiter l'ouverture de la bouteille et de conduire à des marqueurs analysables. Simon Fahrni et ses collègues de l'université de Californie à Irvine prélèvent ces vapeurs par l'application d'un vide au-dessus du bouchon : perméable aux échanges gazeux, ce dernier permet de récupérer des échantillons qui sont analysés par le dosage du carbone 14.

Pourquoi le carbone 14 ? Les essais nucléaires ont augmenté la proportion de cet isotope dans le dioxyde de carbone atmosphérique, puis dans les végétaux à partir des années 1960, et la teneur en carbone 14 a ensuite régulièrement diminué : on peut donc, en dosant cet isotope, déterminer l'année où le vin a été produit, et 20 microgrammes de carbone suffisent amplement à cet effet.

Simon Fahrni et ses collègues ont testé leur méthode sur 32 vins produits entre 1934 et 2006 et appartenant à un collectionneur : Clos-des-Lambrays, Château-Latour, Château-Lafite-Rothschild, Château-Mouton-Rothschild, Château-Haut-Brion, cabernet sauvignon de Robert Mondavi ... Toutes les bouteilles avaient été achetées directement au producteur, et toutes avaient un bouchon en bon état.

Sur les 32 vins testés, 23 ont finalement été reconnus authentiques sans ambiguïté. Sur les neuf vins restants, cinq contenaient trop peu de carbone pour que la datation soit précise, et ce en raison de bouchons trop peu perméables. Pour les quatre derniers échantillons, la quantité de carbone 14 était anormalement faible, de sorte que l'on a supposé une contamination par des composés organiques anciens ; mais comme ces bouteilles ont été achetées directement au producteur dans les années qui ont suivi la récolte, la fraude est peu probable. Deux des vins (Clos-des-Lambrays 1934 et 1945) avaient été rebouchonnés, ce qui explique la faible teneur en carbone 14 observée pour le vin de 1945.

La technique est prometteuse, bien qu'elle soit surtout précise pour les vins embouteillés entre 1955 et 1990, où la décroissance annuelle de la teneur en carbone 14 est rapide. Pour les périodes plus anciennes ou plus récentes, la teneur en radio-isotope du carbone varie peu d'année en année, ce qui nuit à l'authentification, mais les chercheurs perfectionnent leur méthode. ■

Hervé THIS, physico-chimiste, est directeur du Centre international de gastronomie moléculaire AgroParisTech-Inra et directeur scientifique de la fondation Science & culture alimentaire (Académie des sciences).

Retrouvez la rubrique Science & gastronomie sur www.pourlascience.fr

PAUL FRANCK (CHRISTOPH GRAMMONT)

france culture

C'EST POUR VOUS

LA MARCHE DES SCIENCES

DÉCOUVERTES, INVENTIONS, AVENTURES SAVANTES AU FIL DE L'HISTOIRE

AURÉLIE LUNEAU

CHAQUE JEUDI

14H - 15H

Écoute, réécoute, podcast

franceculture.fr

MATHÉMATIQUES

Euler et le parcours du cavalier

Jacques Sesiano

Presses polytechniques et universitaires romandes, 2015 (280 pages, 52,15 euros).

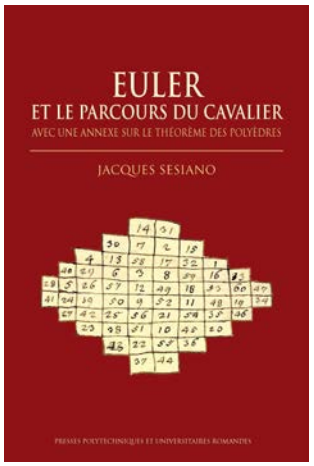
Spécialiste d'histoire des mathématiques, l'auteur nous a déjà offert plusieurs ouvrages originaux sur les carrés magiques dans les pays islamiques et au Moyen Âge, les récréations mathématiques et l'histoire de l'algèbre. Il nous propose ici un ouvrage érudit et minutieux sur l'intérêt que le grand Leonhard Euler (1707-1783) éprouva pour le problème du cavalier.

Le problème du cavalier consiste à faire passer cette pièce une seule fois sur chacune des 64 cases d'un échiquier en respectant la règle qui régit le déplacement d'un cavalier aux échecs. S'il est relativement facile de parvenir à passer par plus de 60 cases, couvrir toutes les cases de l'échiquier est redoutablement difficile.

L'auteur explique la démarche d'Euler et ses progrès. Point particulièrement intéressant, il a déniché des documents originaux, qui n'avaient jamais été publiés. Ainsi, en plus de l'article d'Euler sur le parcours du cavalier, il reproduit des notes manuscrites du mathématicien sur le sujet.

Pour compléter cette incursion rare dans la pensée d'Euler, le livre se termine par une étude sur le théorème d'Euler relatif aux polyèdres. L'auteur s'est livré à une comparaison des démonstrations d'Euler, de Legendre, de Cauchy et de Lhuilier, qui en présentent des exceptions. Cet ouvrage rare intéressera tous ceux que les mathématiques fascinent, car les raisonnements du grand Euler ne demandent aucune connaissance préalable et sont faciles à suivre par toute personne s'en donnant la peine. Dans le cas des cavaliers comme dans celui des polyèdres, le lecteur revit la naissance ancienne de domaines de recherche toujours présents.

Jean-Paul Delahaye
Prof. émérite, Université de Lille 1



SCIENCE ET SOCIÉTÉ

La Peur exponentielle

Benoît Rittaud

PUF, 2015 (448 pages, 21 euros).

Voici un curieux ouvrage. L'auteur y identifie l'existence d'une nouvelle peur, qui traduit implicitement un concept mathématique abstrait : la peur de l'exponentielle. Il met en évidence que cette peur est sous-jacente à de très nombreux discours alarmistes actuels sur l'évolution de notre monde.

Pour expliquer son observation, il se sert de la légende orientale du grain de blé placé sur la première case d'un échiquier, puis multiplié par 2 à chaque case, ce qui produit au bout des 64 cases le résultat d'une croissance exponentielle

de base 2, soit 2^{64} grains. Dans la légende, cette quantité de grains est supérieure aux richesses du royaume des années durant.

Cette peur exponentielle est donc logique dans un monde fini dont les ressources ne peuvent qu'être épuisées par une croissance à taux constant. Elle se manifeste à propos de l'épuisement des ressources naturelles, de la démographie, du réchauffement climatique.

Soulignons cependant qu'elle ne peut exister qu'à propos de ressources matérielles finies, mais pas à propos de ressources immatérielles, qui *a priori* peuvent croître à l'infini, du moins beaucoup plus longtemps. La tendance actuelle aux *big data*, c'est-à-dire le passage des téra (10^{12}), péta (10^{15}), exa (10^{18}) au zettaoctet (10^{21}) et bientôt au yottaoctet (10^{24}) illustre cette possibilité. Faut-il trouver là les raisons de l'optimisme prudent de certains économistes qui voient dans les *big data* la prochaine révolution ?

Quoi qu'il en soit, ce livre bien documenté et doté d'un appareil critique important est très intéressant à lire et source d'un optimisme raisonné.

Pierre Bertrand
Université de Clermont-Ferrand

PALÉONTOLOGIE

Le Secret de l'archéobélodon

Alexandre Mille, Jean-Guy Michard et Pascal Tassy

MNHN/Belin, 2015 (208 pages, 23 euros).

Les fossiles racontent des histoires. Celle de la vie sur Terre au premier chef, mais aussi parfois d'autres récits.

Prenant le cas d'un squelette de mastodonte exhumé des terrains miocènes du Gers, les auteurs nous content à la fois l'histoire des chercheurs qui se sont penchés sur ce fossile et celle de l'institution qui fut le cadre principal de leurs travaux, à savoir le Muséum d'histoire naturelle de Paris. Des histoires mêlées qui s'étalent sur deux siècles !

Comme souvent en paléontologie, tout commence avec Georges Cuvier qui, le premier, comprend les relations de parenté entre les éléphants, les mammouths et les mastodontes (il est l'auteur de ce dernier terme). Rapidement, des personnages moins connus du grand public entrent en scène. C'est d'abord Édouard Lartet, avocat gersois devenu un brillant paléontologue, qui découvre le riche gisement de fossiles de Sansan, dans les collines de l'Armagnac.

C'est ensuite Charles Laurillard, discret collaborateur de Cuvier, qui sur ce site découvre le squelette qui est au centre de ce livre. Albert Gaudry en fera ensuite une des pièces maîtresses de la première galerie de paléontologie qu'il installe au Muséum, puis du grand troupeau fossile qui doit symboliser l'évolution des espèces, dans la galerie que nous connaissons de nos jours, inaugurée en 1898.

L'*Archaeobelodon*, comme on le nomme aujourd'hui, joue un rôle important dans la reconstitution de l'évolution des proboscidiens, telle que la déchiffrent progressivement les paléontologues, qu'ils soient de France ou d'ailleurs (l'Autrichien Schlesinger, l'Américain Osborn et l'Allemand Tobien figurent en bonne place dans ce récit). Mais au fil des montages et démontages successifs de son squelette, il illustre aussi l'histoire de cette galerie de paléontologie, aujourd'hui pour le moins décrépite. On sent un peu d'amertume chez les auteurs quand ils évoquent cette situation, mais leur livre, bien écrit et bien illustré, n'en est pas moins une réussite, une approche originale et plaisante de l'histoire de la paléontologie à travers un de ses épisodes injustement oubliés.

Eric Buffetaut

CNRS, Laboratoire de géologie de l'École normale supérieure, Paris

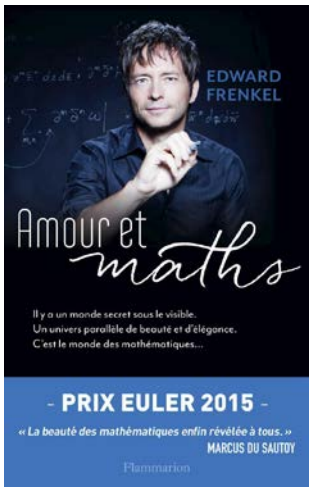
MATHÉMATIQUES

Amour et maths

Edward Frenkel

Flammarion, 2015
(364 pages, 23,90 euros)

La recherche en mathématiques est un compagnonnage : Edward Frenkel raconte ses premiers pas de chercheur doué, l'aide qu'il reçoit



de mathématiciens confirmés, puis sa collaboration d'égal à égal avec les meilleurs spécialistes. Aujourd'hui, avec Edward Witten et d'autres éminences de la discipline, il recherche la raison profonde qui unit certaines parties des mathématiques (l'unification des mathématiques du programme de Langlands) à la physique quantique. Ces coopérations sont le cercle vertueux et prolifique des influences mutuelles entre mathématiciens.

Par son itinéraire personnel, Edward Frenkel décrit comment les premiers essais d'un chercheur déterminent la suite de sa carrière, comment les interactions avec ses collègues élargissent le champ de vision de chacun et définissent les verrous qui bloquent l'épanouissement des théories nouvelles. La description d'Edward Frenkel est un sésame nouveau pour entrevoir la vie des mathématiques.

La passion d'Edward Frenkel aurait pu être découragée par l'antisémitisme qui prévalait en Union soviétique dans les années 1980 : élève brillant, il fut recalé à l'examen d'entrée à l'université d'État de Moscou sous des prétextes fallacieux et indignes, par des examinateurs pervertis, soumis aux diktats de l'idéologie. Il survécut intellectuellement aux tortures racistes du système soviétique grâce à sa famille, ses amis, certains de ses professeurs. Tout ce qui ne l'abat pas le rend plus fort et le récit de ses intérêts est émouvant : « Le sujet [le problème mathématique du moment] me passionnait tant que j'essayais de m'endormir le soir aussi vite que possible, afin que le matin suivant arrive plus tôt. »

Edward Frenkel tente de décrire les recherches actuelles du millier de mathématiciens qui travaillent sur l'unification des lois de la physique, l'intégration de la gravitation au domaine quantique. Louable tentative de la part de notre auteur, qui présume toutefois des forces du lecteur moyen, lequel peine à métaboliser les splendeurs vertigineuses de l'abstraction.

Il n'empêche, de cette lecture difficile se dégagent une aura de compréhension et une constatation étonnante, presque métaphysique : les abstractions mathématiques sont fondées sur la logique et la beauté des formes et, ô divine surprise, la réalité invisible s'y conforme. Edward Frenkel maîtrise la description des sens à nous-mêmes cachés, sens qui sont excités par les nouvelles visions mathématiques de la réalité. Les mathématiques inventées se révèlent des découvertes, ce qui met fin à un long débat sur leur nature.

Philippe Boulanger

Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur www.pourlascience.fr

Les Rêveurs lunaires

Cédric Villani et Edmond Baudouin

Gallimard/Grasset, 2015
(192 pages, 22 euros)

Au cours d'une conversation reproduite en bandes dessinées, le mathématicien Cédric Villani partage ici avec le dessinateur Baudouin l'intérêt qu'il éprouve pour trois scientifiques et un militaire qui ont joué un rôle crucial durant la Seconde Guerre mondiale. Les dessins pleins d'atmosphère de Baudouin et les pensées que Cédric Villani prête à ces personnages suggèrent que, loin des clichés, c'est d'abord l'attitude de certains acteurs clefs du conflit, souvent inconnus, qui a décidé de la victoire. Une intéressante lecture humaniste de ce qui fait vraiment la réalité sociale.

Voyage à travers les climats de la Terre

Gilles Ramstein

Odile Jacob, 2015
(352 pages, 24,90 euros)

L'auteur décrit ce qui a fait le climat de la planète Terre depuis l'Archéen, lorsque l'atmosphère était composée d'un « ballet de gaz à effet de serre », jusqu'à l'« Anthropocène » actuel. On découvre la grande oxygénation de la Terre il y a quelque 2,2 milliards d'années, les chocs thermiques qu'elle a entraînés, qui ont créé une planète chaude puis entièrement englacée avant l'évolution vers un régime de glaciations et déglaciations successives. Que conclure de ce texte passionnant ? Que même si nous avons progressé, la paléoclimatologie contient encore beaucoup d'hypothèses à tester.

Maladie de Lyme

Viviane Schaller

Thierry Soucar, 2015
(224 pages, 16,90 euros).

Le chef du département d'infectiologie de l'hôpital de Garches déclarait à *Pour la Science* (n° 450) que la sérologie de la maladie transmise par la tique « n'est pas fiable ». L'auteure, qui en est convaincue, a décidé de tester de nombreux cas suspects par un test non homologué en France, de sorte que son laboratoire d'analyse biologique a été fermé par le ministère de la Santé. Elle présente ici sa critique scientifique des sérologies françaises pour identifier cette maladie aujourd'hui épidémique en Europe.

RAISONNER EST UNE ERREUR

Loin de protéger des erreurs, raisonner est un moyen d'en commettre : se tromper est naturel, et raisonner multiplie les occasions de le faire. En outre, les erreurs de raisonnement demandent un travail parfois long et difficile. Alors, on n'y renonce pas volontiers. On s'accroche avec plus de véhémence aux erreurs qu'on a faites en se donnant du mal qu'à celles faites à l'étourdie. Pour diminuer le risque de s'obstiner dans ses erreurs, une seule solution, donc : ne jamais raisonner !

COMPRENDRE LE PLAISIR DE COMPRENDRE

On explique quelque chose à un enfant. On lui demande s'il a compris, il répond oui, puis on le voit en déduire un comportement inapproprié. Il avait compris, certes – mais à sa façon.

Comprendre est un plaisir. Mais le fait d'éprouver ce plaisir ne prouve pas qu'on a compris ! Ou plutôt, chacun comprend à sa façon – les adultes comme les enfants. Les plaisirs ne sont pas évaluables. On ne peut pas dire que mon plaisir à telle musique est plus grand que le vôtre à telle autre, ni que mon plaisir devant telle peinture est plus vrai que le vôtre devant telle autre, ou lui est égal. Il en va de même pour ce qui est de comprendre. J'ai plaisir à comprendre telle théorie, vous aussi, mais il n'y a guère moyen de comparer les représentations qu'elle induit dans nos esprits.

Pour savoir si vous avez compris, je n'ai que votre affirmation que tel est le cas. Pour savoir si votre compréhension s'accorde à la mienne, je n'ai que l'observation de votre comportement. Indices fragiles ! L'acte de comprendre garde bien du mystère.

Même si les neurosciences réussissaient à observer ce qui se produit dans un cerveau lorsqu'il comprend, il resterait une part de subjectivité limitant la portée de toute définition objective de ce qu'on appelle comprendre : comprendre fait éprouver un certain type de plaisir, que chaque enfant, petit à petit, découvre, explore et fait sien sans avoir besoin qu'on lui dise ce que c'est, comme il découvre et explore les autres types de plaisirs offerts par la vie sans avoir besoin qu'on lui dise ce que c'est.

AINSI SOIT-IL

En général, la syntaxe des textes mathématiques, banale et monotone, ne recourt guère qu'aux constructions sujet-verbe-complément (« La fonction est un majorant ») ou sujet-verbe *être*-attribut (« La fonction est continue »). Mais il y a une exception. Quand le mathématicien dit : « Soit E un ensemble », il sort de la banalité. La construction verbe *être* au subjonctif-sujet me semble la seule à ne se rencontrer qu'en mathématiques.

Les esprits malicieux sourient, à voir le mathématicien manipuler l'ensemble E comme si, en proclamant « Soit E un ensemble », il l'avait fait exister. Il se prend pour Dieu, il croit que sa parole est créatrice.

Attention ! Il ne dit pas : « Qu'un ensemble E soit. » Or c'est cette formulation-là qui imiterait Dieu (quand Il parle français ; dans d'autres langues, l'affaire se présente autrement). « Que la lumière soit » : le substantif apparu de but en blanc fait surgir *ex nihilo* la substance qu'il désigne.

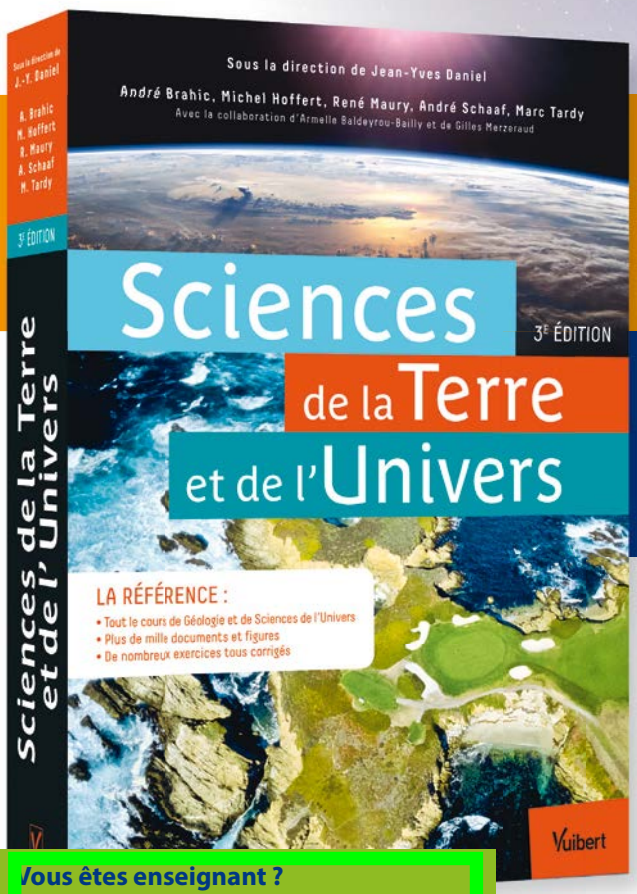
L'effet de « soit » placé devant le substantif se réduit à la mise en place d'un cadre de travail. S'interroger sur le sens exact que prend alors « soit » revient à s'interroger sur la nature des objets mathématiques. Ne nous plongeons pas dans cette question – bouteille à l'encre dans laquelle nous ne manquerions pas de nous noyer.

UN RÊVE DE SOUVENIRS ALGÉBRIQUES

Même si je ne puis pas le démontrer, j'ai lieu de penser que, vu mon âge et ce qu'il a fait de ma mémoire, nombreux sont les livres que j'ai lus, mais dont je ne me souviens plus que je les ai lus. De ces livres, bien sûr, j'ai aussi oublié le contenu.

Il est très probable que sont également nombreux les livres dont je ne me souviens plus que je ne les ai pas lus. Plût au ciel que les règles de l'algèbre s'appliquent à eux ! Le contenu de ces livres-là, puisque je ne me souviens pas que je ne les ai pas lus, serait très présent à ma mémoire : moins par moins fait plus, n'est-ce pas ? ■

Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal 5636 – octobre 2015 – N° d'édition M0220456-01 – Commission paritaire n° 0912 K 82029 – Distribution : Presstalis – ISSN 0 153-4092 – N° d'imprimeur I01/200 440 – Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé



SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

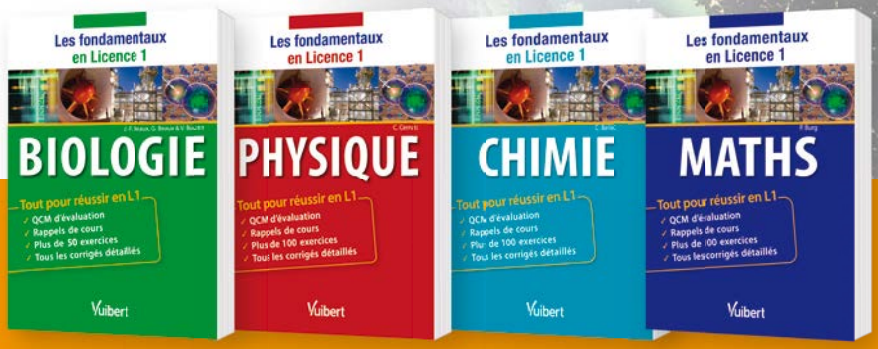
Sous la direction de Jean-Yves Danie

Le manuel de référence des étudiants en géologie et en sciences de l'Univers, en couleurs, avec de nombreux exercices corrigés et plus de 1000 documents et figures.

332 pages
ISBN : 978-2-311-00967-5
45,00 €

Vous êtes enseignant ?
Vous souhaitez découvrir cet ouvrage ?
Contactez-nous !
enseignant@deboeck.com

Les fondamentaux en première année



Strictement conforme aux cursus de première année scientifique, cette série d'ouvrages permet aux étudiants de renforcer leurs compétences et leur autonomie dans ces différentes disciplines.

Vous y trouverez :
- Un QCM d'évaluation en début de chapitre pour tester ses acquis.
- Des rappels de cours pour réviser les grandes notions abordées durant l'année.
- De nombreux exercices d'application intégralement corrigés pour s'exercer efficacement.

BIOLOGIE
Jean-François Beaux, Ghislaine Beaux et Valérie Boutin
240 pages
ISBN : 978-2-311-01238-5
21,00 €

PHYSIQUE
Christian Cerruti
224 pages
ISBN : 978-2-311-01097-8
21,00 €

CHIMIE
Christian Bellec
208 pages
ISBN : 978-2-311-01096-1
21,00 €

MATHÉMATIQUES
Pierre Burg
256 pages
ISBN : 978-2-311-01095-4
21,00 €

En librairie et sur Vuibert.fr

Vuibert

SPÉCIAL | AGENTS DES SERVICES PUBLICS

JUSQU'À **100 €** OFFERTS
POUR LES MOINS DE 30 ANS*

Votre vocation fait votre fierté, la nôtre est de vous assurer.

En tant qu'agent du service public, vous vous engagez pour les autres, alors GMF s'engage pour vous en vous proposant, par exemple, d'assurer votre véhicule même lorsque vous l'utilisez pour des déplacements professionnels, sans supplément de cotisation. Et pour aller plus loin, GMF propose des garanties spécifiques liées à votre fonction : une garantie perte de revenu (traitement et primes) en cas d'arrêt de travail, des solutions d'épargne sûres et disponibles pour commencer à préparer votre retraite.

Rejoignez GMF - 1er assureur des agents des services publics.
Pour en savoir plus rendez-vous sur www.gmf.fr

GMF
ASSURÉMENT *humain*

*50 € pour l'assurance Auto Pass et 50 € pour l'assurance Santé Pass. Offre réservée aux jeunes agents des services publics de moins de 30 ans, la 1ère année, à la souscription d'un contrat d'assurance auto. Offre valable jusqu'au 31/12/2015.

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 sa filiale GMF Assurances. Adresse postale : 45930 Orléans Cedex 9.