

MÉDECINE

L'amertume,
agent de l'immunité

CLIMATOLOGIE

L'impact de la fonte
du permafrost

ÉCOLOGIE

Recenser les tigres
pour les sauver

■ POUR LA

SCIENCE

Mars 2017 - n° 473

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

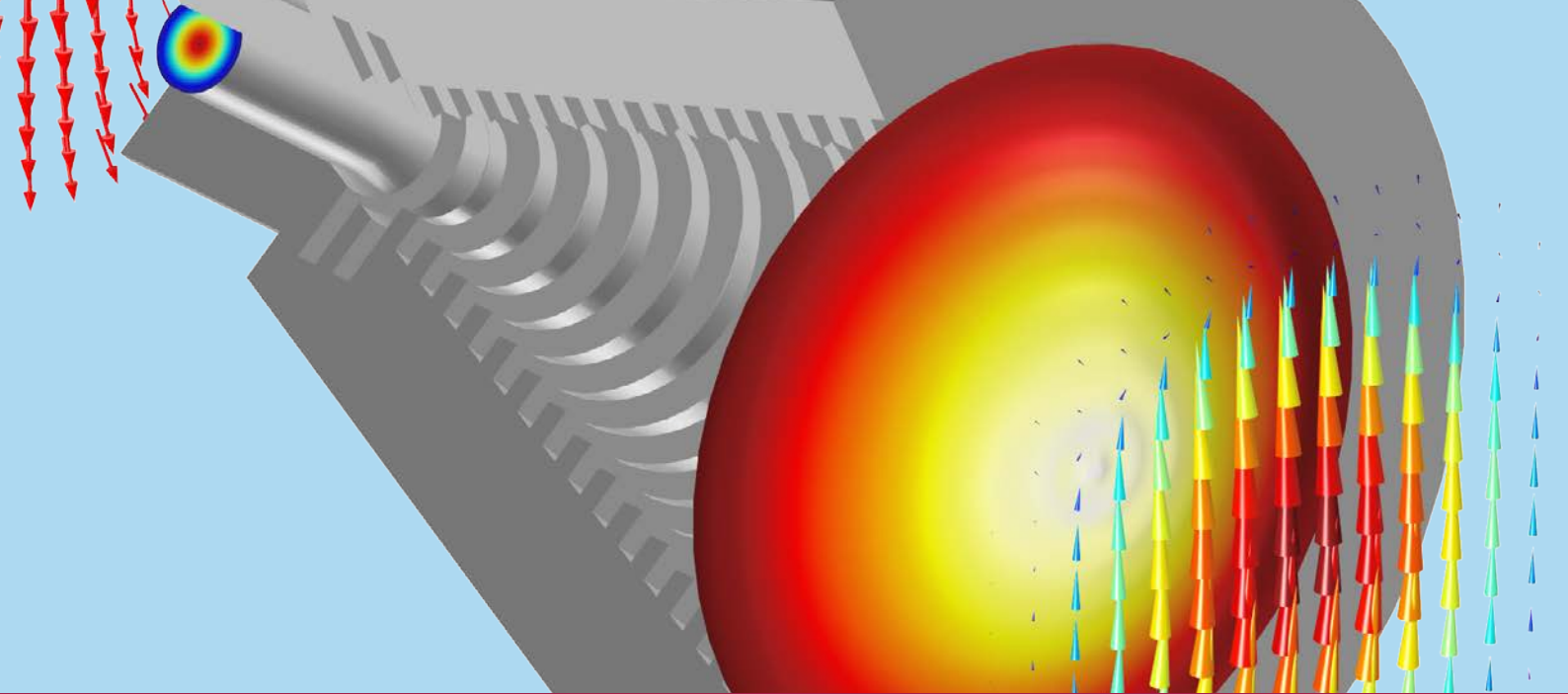
Né du chaos

Le Système solaire,
une exception
dans l'Univers

PHYSIQUE

2018 : LE KILOGRAMME DEVIENT QUANTIQUÉ





LA MULTIPHYSIQUE POUR TOUS

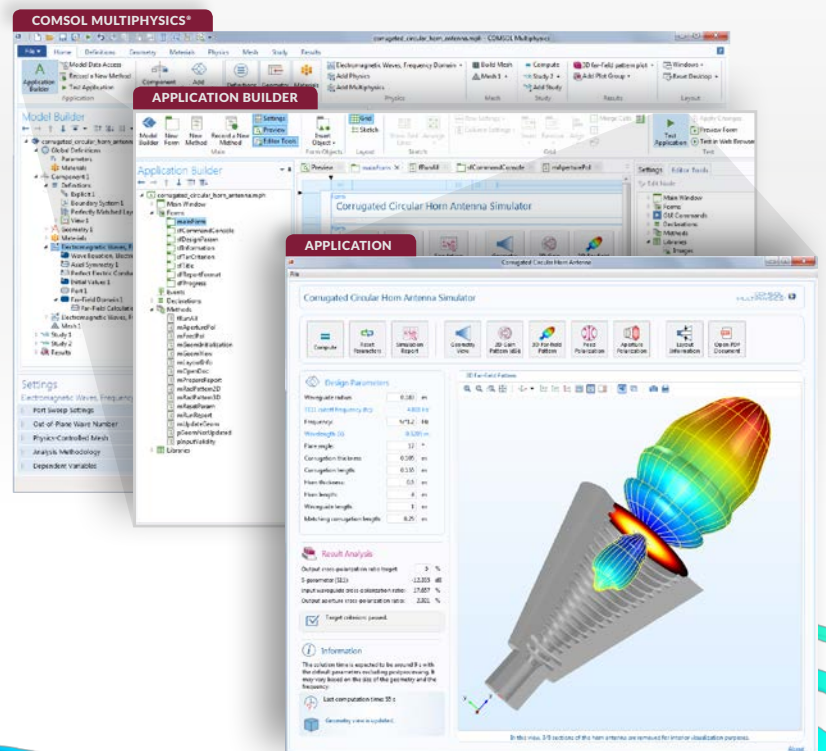
L'évolution des outils de simulation numérique vient de franchir un cap majeur.

Des applis spécialisées sont désormais développées par les spécialistes en simulation avec l'application Builder de COMSOL Multiphysics®.

Une installation locale de COMSOL Server™, permet de diffuser les applis dans votre organisme et dans le monde entier.

Faites bénéficier à plein votre organisme de la puissance de l'outil numérique.

comsol.fr/application-builder



POUR LA SCIENCE

www.pourlascience.fr

8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06
Tel. 01 55 42 84 00

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, Sean Bailly

Dossier Pour la Science

Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin

Développement numérique : Philippe Ribeau-Gésippe

Directrice artistique : Céline Lapert

Maquette : Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy

Correction et assistance administrative : Anne-Rozenn Jouble

Marketing & diffusion : Laurence Hay et Ophélie Maillet

Direction financière et direction du personnel : Marc Laumet

Fabrication : Marianne Sigogne et Olivier Lacam

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 Barrau, Bill Burns, Mathilde Causse, Hao Fang, Patrick

Forterre, Gérard Fouchard, Sophie Gallé-Soas, Marie-Laure Geai,

Michelle Garcin, André Nel, Laurence Perotto, José Pessis,

Christophe Pichon, Mickael Rigault, Daniel Tacquenet,

Hayan Tong

PRESSE ET COMMUNICATION

Susan Mackie

susan.mackie@pourlascience.fr - 01 55 42 85 05

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

ABONNEMENTS

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

Courriel : pourlascience@abopress.fr

Téléphone : 03 67 07 98 17

Adresse postale : Service des abonnements - Pour la Science,

19 rue de l'Industrie, BP 90053, 67402 Illkirch Cedex

Tarifs d'abonnement 1 an - 12 numéros

France métropolitaine : 59 euros - Europe : 71 euros

Reste du monde : 85,25 euros

COMMANDES DE LIVRES OU DE MAGAZINES

<http://boutique.pourlascience.fr/>

DIFFUSION

Contact kiosques : À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet

Tel : 04 88 15 12 41

Information/modification de service/réassort :

www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in chief : Mariette DiChristina.

Executive editor: Fred Gutel. 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 tra-

duction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous

les pays. La marque et le nom commercial « Scientific Ameri-

can » sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence ac-

cordée à « Pour la Science S.A.R.L. ».

En application de la loi du 11 mars 1957, il est inter-

dit de reproduire intégralement ou partiellement la

présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du

Centre français de l'exploitation du droit de copie

[20 rue des Grands-Augustins - 75006 Paris].



Maurice Mashaal
rédacteur en chef

Une exception née du chaos

Il y a plus de vingt ans, en 1995, on découvrait pour la première fois une planète en orbite autour d'un soleil autre que le nôtre. Depuis, plusieurs milliers d'exoplanètes, donc presque autant de systèmes planétaires, se sont ajoutées aux catalogues de l'astronomie. Et à mesure que les découvertes se multiplient, le Système solaire que nous habitons apparaît de plus en plus comme une banalité cosmique.

Le Système solaire, une banalité ? En fait, pas du tout. Car sa structure, avec quatre petites planètes rocheuses dans la région interne, proche de l'étoile, et quatre planètes géantes et gazeuses dans la région externe, ne semble pas avoir d'équivalents parmi les systèmes extrasolaires connus à ce jour.

L'effet chasse-neige gravitationnel de Jupiter et Saturne

Ce caractère atypique a incité les astrophysiciens à revoir les scénarios qui décrivent la formation du Soleil et de son cortège planétaire à partir d'un nuage géant de gaz et de poussière. Et il y a peu, leurs travaux ont convergé pour raconter une toute nouvelle histoire. Trois des principaux protagonistes de ces recherches sur les débuts du Système solaire nous l'exposent dans ce numéro [voir pages 22 à 31].

La nouvelle version de ce lointain passé qui remonte à environ 4,5 milliards d'années diffère beaucoup du récit précédent où, somme toute, la formation du cortège solaire se déroulait tranquillement. Elle décrit plutôt un gigantesque chaos où, notamment, Jupiter et Saturne ont dévié vers le Soleil, créant des collisions destructrices et un effet chasse-neige gravitationnel, avant de revenir sur des orbites lointaines. Un chaos bien loin de la régularité d'horloge des mouvements planétaires d'aujourd'hui, sur laquelle l'humanité s'est longtemps appuyée pour concevoir le temps et le mesurer. ■

3 Édito

Actualités

- 6 L'isomorphisme des graphes, moins complexe qu'on ne pensait
- 7 Mieux cultiver pour stocker le carbone
- 8 Une mutation génétique qui a profité au cerveau d'*Homo sapiens*
- 11 Le puissant arsenal de guerre des bactériophages



Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

- 14 **Point de vue**
Les brevets sur les plantes mettent en danger le modèle agricole européen
Frédéric Thomas
- 18 **Cabinet de curiosités sociologiques**
Pourquoi les chantiers sont-ils toujours en retard ?
Gérald Bronner
- 20 **Homo sapiens informaticus**
Sputnik 2.0 : il faut relancer l'enseignement des sciences
Gilles Dowek



Ce numéro comporte une offre d'abonnement L'Express sur une sélection d'abonnés France métropolitaine.
En couverture : © Kenn Brown Mondolith Studios

À LA UNE

22 ASTROPHYSIQUE Le Système solaire, une exception née du chaos

Konstantin Batygin, Gregory Laughlin et Alessandro Morbidelli

Les premiers âges du Système solaire se caractérisent par des planètes vagabondes aux orbites instables et des collisions planétaires destructrices. Ce chaos a engendré un système qui, comparé aux autres systèmes planétaires découverts, constitue une anomalie.

32 ÉCOLOGIE Mieux recenser les tigres pour les sauver

Ullas Karanth

Les techniques de suivi des populations de tigres ont connu de grands progrès au cours des dernières années. Encore faut-il que les organismes chargés de la protection du grand félin asiatique les appliquent.

40 MATHÉMATIQUES La simulation numérique au service du son 3D

Matthieu Aussal et François Alouges

Un univers sonore comme si vous y étiez, mais avec un simple casque d'écoute : grâce notamment à des méthodes efficaces pour résoudre numériquement certaines équations, ce rêve des techniques de réalité virtuelle se concrétise enfin.

48 MÉDECINE L'amertume, sentinelle du système immunitaire

Robert Lee et Noam Cohen

Les récepteurs du goût amer ne se trouvent pas seulement sur la langue. Présents dans tout l'organisme, ils forment... une première ligne de défense contre les infections !

56 CLIMATOLOGIE

Pergélisol et climat : les chiffres de la menace

Edward Schuur

Le dégel du sol arctique va vraisemblablement accélérer le réchauffement climatique pendant le XXI^e siècle. Un réseau mondial de chercheurs s'active afin d'évaluer à quel point.

62 PHYSIQUE

Vers une définition quantique du kilogramme

Tim Folger

Plus fiable et plus précise, la nouvelle définition du kilogramme reposera, à partir de 2018, sur une constante fondamentale liée à la physique quantique.



70 MÉTROLOGIE

« Le nouveau kilogramme sera plus pratique »

Entretien avec Richard Davis

À partir de 2018, le kilogramme sera défini à partir de la constante de Planck et non d'un cylindre de platine conservé dans un coffre-fort près de Paris. Richard Davis nous explique pourquoi cette nouvelle définition sera plus fiable et, surtout, plus pratique d'utilisation.

72 HISTOIRE DES TECHNIQUES

La saga du premier câble transatlantique

Ainissa Ramirez

Il y a 160 ans débutait une épopée qui n'avait rien à envier à celle du rail : la pose d'un câble télégraphique sous-marin reliant l'Amérique à l'Europe.



Rendez-vous

78 Logique & calcul

Le vivant, plus fort que l'électronique

Jean-Paul Delahaye

Des systèmes biologiques sont capables d'enregistrer de l'information et de la traiter, comme le font les ordinateurs.

84 Science & fiction

Glapum'tien, de quelle espèce es-tu ?

J.-Sébastien Steyer et Roland Lehoucq

86 Art & science

Les errances du jeune Werner

Loïc Mangin

89 Idées de physique

Le point de rupture des spaghettis

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik



92 Question aux experts

Qu'est donc le spin ?

Jean-Marc Lévy-Leblond

94 Science & gastronomie

Jeux de gels

Hervé This

96 À lire

98 Bloc-notes

Les chroniques de Didier Nordon

POUR LA
SCIENCE.fr

LETTRE D'INFORMATION



Ne manquez pas
la parution
de votre magazine
grâce à la NEWSLETTER

- Notre sélection d'articles
- Des offres préférentielles
- Nos autres magazines en kiosque



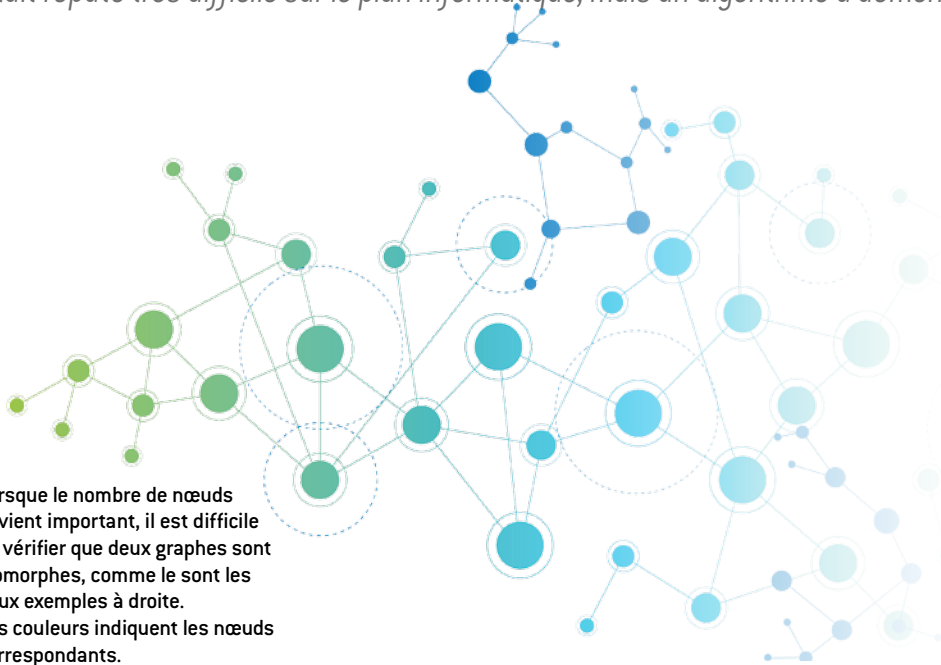
Recevez gratuitement la lettre d'information en inscrivant uniquement votre adresse mail sur www.pourlascience.fr

Actualités

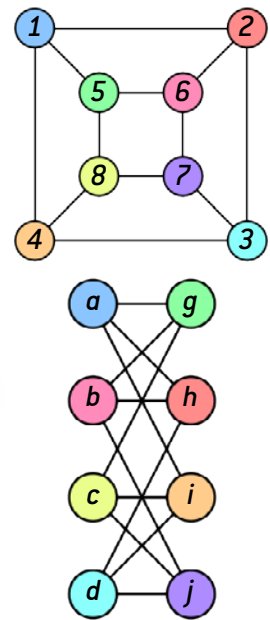
Mathématiques

L'isomorphisme des graphes, moins complexe qu'on ne le pensait

Comment s'assurer que deux graphes d'aspect différent sont en fait les mêmes ? Ce problème était réputé très difficile sur le plan informatique, mais un algorithme a démenti cette idée.



Lorsque le nombre de nœuds devient important, il est difficile de vérifier que deux graphes sont isomorphes, comme le sont les deux exemples à droite. Les couleurs indiquent les nœuds correspondants.



© Shutterstock.com/Rachael Amott - chris-martin

En décembre 2015, László Babai, de l'université de Chicago, a annoncé un résultat qui promettait d'être un événement dans le domaine de l'informatique théorique et de la théorie de la complexité : le « problème d'isomorphisme des graphes » pourrait être résolu avec un algorithme « quasi polynomial » et serait donc moins complexe qu'on ne le pensait. Mais près d'un an après son annonce fracassante, le 4 janvier 2017, László Babai a signalé qu'un autre mathématicien, Harald Helfgott (université de Göttingen/CNRS-université Paris-Diderot), avait trouvé une faille dans son raisonnement... Quelques jours plus tard, László Babai est revenu à la charge avec un correctif. Peu après, lors d'un séminaire Bourbaki, Harald Helfgott a présenté

les résultats de László Babai et a confirmé qu'ils sont corrects.

Mais de quoi s'agit-il au juste ? Le problème relève de la théorie des graphes, domaine des mathématiques et de l'informatique qui a connu un formidable essor ces dernières décennies avec le développement des réseaux de télécommunications, et en particulier d'Internet. Un graphe est une représentation abstraite d'objets et de leurs relations par un ensemble de points ou « nœuds », reliés par des arêtes. La théorie des graphes fournit des outils puissants pour analyser les réseaux.

La question posée est la suivante. Si vous êtes confronté à deux graphes ayant le même nombre de nœuds, comment déterminer si ces graphes sont équivalents, c'est-à-dire si on peut faire correspondre

parfaitement les nœuds et arêtes d'un graphe à l'autre ? Si le nombre de nœuds est petit, un algorithme peut vérifier rapidement que les graphes sont équivalents en testant toutes les configurations. Mais avec cette méthode brutale, le temps nécessaire augmente exponentiellement avec le nombre de nœuds. Il devient très vite hors de portée pour de grands graphes. Peut-on faire mieux ? Ce problème d'isomorphisme des graphes résiste depuis plus de trente ans.

De façon générale, plus un problème est riche en paramètres, ici le nombre n de nœuds du graphe, plus le temps de calcul est long. Les mathématiciens répartissent les problèmes en deux classes de complexité. Les problèmes « faciles » ont un temps de résolution proportionnel à une puissance de n , par

exemple à n^2 ou n^3 , et peuvent être en général résolus avec un ordinateur. On parle de problème P (P pour « polynomial »). Les problèmes « difficiles », en revanche, demandent un temps de calcul exponentiel, par exemple de la forme 2^n , une fonction qui croît plus vite qu'un polynôme en n . On parle de problèmes NP, ou non polynomiaux (au sens strict, les problèmes NP sont ceux dont la résolution est non polynomiale, mais dont on peut vérifier une solution en un temps polynomial).

Pour en revenir à l'isomorphisme des graphes, ce problème était considéré comme un problème NP. Cependant, László Babai et Eugene Luks, un mathématicien de l'université de l'Oregon, avaient développé dans les années 1980 des méthodes théoriques performantes pour

Climatologie

Mieux cultiver pour stocker le carbone

Lancée lors de la COP 21, l'initiative « 4 pour 1 000 » [ou « 4 ‰ »] vise à séquestrer dans les sols chaque année une masse de carbone égale à celle que l'humanité émet dans l'atmosphère. Vincent Chaplot, qui s'est chargé du volet sud-africain d'une étude internationale préliminaire, nous explique comment cet objectif pourrait être atteint.

comparer des graphes. Et des algorithmes développés par ailleurs se montraient rapides quelle que soit la complexité des graphes comparés. Ces algorithmes de test d'isomorphisme de graphes sont utilisés par exemple en chimie pour vérifier que des molécules complexes sont les mêmes malgré des conformations différentes.

Les mathématiciens se demandaient donc si le problème était vraiment aussi difficile qu'on le pensait. Le résultat de László Babai confirme cette intuition. Il a développé un algorithme dont le temps de calcul augmenterait de façon « quasi polynomiale » (plus précisément : comme $\exp[(\log n)^c]$, où a est de l'ordre de quelques unités) en fonction de n . L'isomorphisme des graphes se rapproche donc de la classe des problèmes faciles.

La stratégie adoptée dans l'algorithme consiste à chercher des symétries dans les deux graphes à comparer et à les décomposer en éléments plus simples selon une procédure récursive. C'est justement dans cette procédure qu'Harald Helfgott a trouvé une faille. Une étape, la procédure « Split ou Johnson », se montrait problématique. Elle consiste à identifier à l'intérieur des deux graphes comparés un sous-graphe de type particulier, un « graphe de Johnson », ou à colorier les graphes d'une façon qui exhibe leurs symétries. Une partie de la procédure rendait l'algorithme instable. Grâce à l'analyse minutieuse de Harald Helfgott, László Babai a corrigé son algorithme tout en conservant sa conclusion : le problème d'isomorphisme des graphes est plus facile qu'on ne le pensait.

Sean Bailly

H. Helfgott, <https://arxiv.org/abs/1701.04372> ; L. Babai, <https://arxiv.org/abs/1512.03547>

Que signifie ce 4 ‰ ?

Vincent Chaplot : Ce programme part d'un calcul simple : nos émissions mondiales sont de 8,9 gigatonnes de carbone d'origine organique par an ; pour les équilibrer, il faudrait fixer autant de carbone dans le sol en plus des 2400 gigatonnes qui y sont déjà. Or $8,9/2400$ égale environ 0,0037, soit à peu près 4 ‰. Le programme portant ce nom vise à étudier les moyens de séquestrer un supplément de 0,4 % du carbone organique qui s'y trouve déjà.

Est-ce possible ?

V. C. : Techniquement, nous avons des solutions, mais la question centrale est que sur les 149 millions de kilomètres carrés de terres émergées, seulement 10 à 20 % sont aujourd'hui des surfaces agricoles où nous pouvons agir. À long terme, si nous nous en donnons les moyens, nous pourrions modifier la séquestration du carbone de 50 % des terres émergées, par exemple en créant des barrières vertes dans le désert, en plantant des forêts ou des prairies. À court terme, nous ne pouvons agir que sur les terres cultivées en y introduisant de nouvelles variétés.

C'est l'objectif du projet Carbofarm que vous portez ?

V. C. : Oui. Il s'agit de déterminer pour divers pays quelles sont les variétés cultivées des principales

céréales déjà sélectionnées qui séquestrent le plus de carbone dans le sol. Nous voulons aussi rechercher les systèmes de cultures rendant le plus de services non seulement aux hommes, mais aussi au sol.

Au sol ? Que voulez-vous dire ?

V. C. : Le carbone est le principal composant de la matière organique, qui nourrit les microbes du sol (lesquels représentent 80 % de la biomasse terrestre) ; le carbone y est associé à l'azote, au phosphore, aux



Vincent Chaplot, directeur de recherche à l'IRD.

métaux, etc. La matière organique joue aussi le rôle d'une éponge pour l'eau, qu'elle filtre comme une station d'épuration.

Dans le cas de l'Afrique du Sud, quelle est la situation des sols ?

V. C. : Seulement 10 % de la surface de ce pays est en surfaces agricoles. Le reste consiste en savanes peu fertiles. La décroissance des stocks de carbone dans le sol s'est en effet intensifiée avec l'arrivée

de l'agriculture moderne au cours des deux derniers siècles et de ses abus d'engrais azotés, qui accélèrent la consommation de la matière organique du sol ; et aussi parce qu'une mauvaise gestion des savanes les a livrées à un pâturage sédentaire suivi d'une dégradation du sol.

Comment redresser la situation ?

V. C. : Avec Carbofarm, nous travaillons déjà à sélectionner des variétés de maïs et de blés qui augmentent les intrants organiques dans le sol ; s'agissant des savanes, il s'agit d'imiter le comportement des herbivores sauvages qui, au lieu de stationner comme les vaches dans leurs enclos, suivent l'herbe, pâturant intensément mais temporairement en un lieu avant de l'abandonner pour longtemps, laissant à la végétation le temps de revenir.

Et en France ?

V. C. : Outre l'agriculture intensive qui exerce toujours la même pression excessive sur l'écosystème, nous avons l'occasion offerte par l'énorme déprise agricole. De plus en plus de terres redeviennent disponibles pour la forêt ou les pâtures. Encore faudrait-il s'en occuper en les rassemblant et en les gérant.

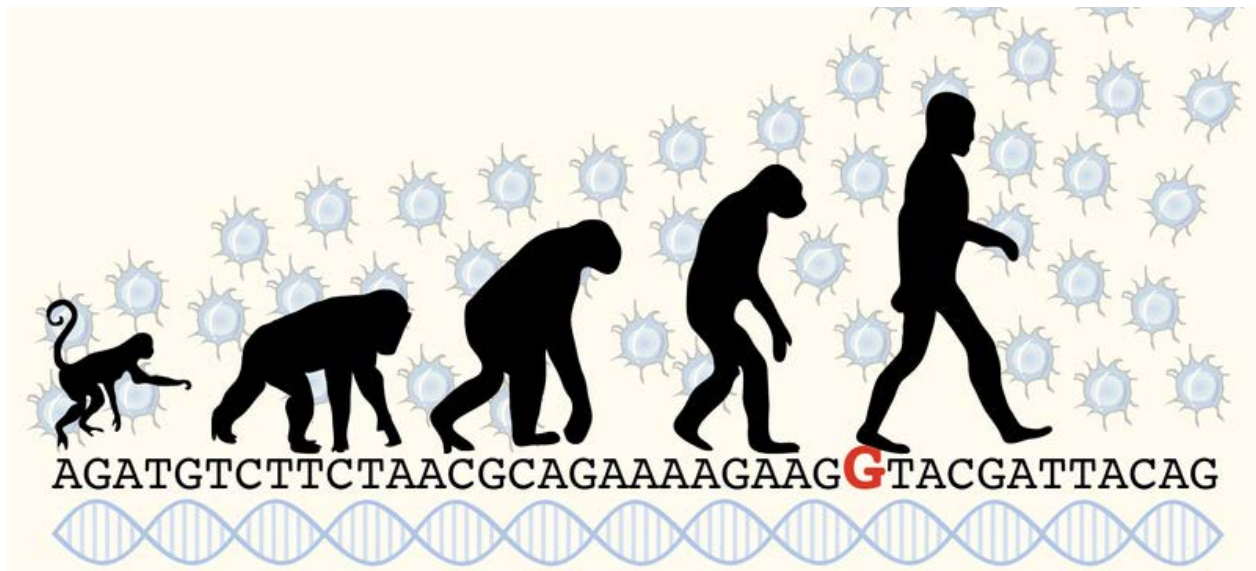
François Savatier

B. Minasny et al., *Geoderma*, vol. 292, pp. 59-86, 2017

Génétique

Une mutation génétique qui a profité au cerveau d'*Homo sapiens*

Une substitution d'une base dans un gène d'*Homo erectus* aurait provoqué une surproduction de neurones et fait franchir à l'évolution humaine une étape cruciale.



© Institut Max-Planck de biologie cellulaire et moléculaire et de génétique

Une mutation d'une base sur un gène d'*Homo erectus* aurait été à l'origine d'un fort développement du cerveau humain.

Les plus grands progrès résultent parfois d'une erreur, d'un accident fortuit aux conséquences incalculables. Prenez le cerveau humain : cet organe d'une complexité inouïe pourrait aussi être le fruit d'un coup du sort. C'est ce qu'ont découvert le paléogénéticien suédois Svante Pääbo et ses collègues, spécialistes de l'ADN préhistorique.

L'événement clé qui a donné un coup de fouet à l'évolution de notre encéphale se serait produit il y a environ 500 000 ans, chez nos ancêtres *Homo erectus*, des hominidés dont le cerveau était, en ce temps, nettement moins volumineux – et probablement moins puissant et moins doué d'abstraction. Mais à cette époque, une mutation totalement aléatoire aurait remplacé, sur le double brin d'ADN d'un de ces lointains aïeux, une base azotée de type C par une base G. Un microévénement qui aurait provoqué une réaction en chaîne. Car du fait de ce changement, un trio de bases C, T, A aurait été remplacé par la séquence G, T, A. Or ce triplet est

interprété par la machinerie de transcription de l'ADN des cellules comme un signal de coupure. Autrement dit, l'ARN messager transcrit du gène concerné (noté *ARHGAP11A*) a été amputé de 55 nucléotides par rapport à sa version originale. D'où la production d'une protéine aux fonctions profondément modifiées.

Jugez plutôt : alors que la protéine de nos ancêtres *Homo erectus* régulaient la croissance de filaments d'actine dans les neurones – des constituants du squelette interne des cellules –, la version *sapiens* stimule la division des neurones à partir de cellules mères, dites progénitrices, dans certaines zones cruciales du cerveau, les ventricules. Avec pour conséquence de produire beaucoup plus de neurones. Résultat : dans nos cerveaux modernes, les cellules progénitrices se divisent à un rythme accru, donnant naissance à de jeunes neurones qui migrent ensuite des ventricules vers la périphérie du cerveau, contribuant à la croissance du cortex ; lequel, à force de s'étendre,

est obligé de se plisser pour tenir de façon compacte à l'intérieur de la boîte crânienne, adoptant cet aspect replié caractéristique du cerveau humain.

D'ailleurs, en transférant la version mutée du gène à des souris, l'équipe de Svante Pääbo a constaté que le cerveau de ces rongeurs produisait des neurones à un rythme supérieur au taux habituel.

Il a donc peut-être suffi d'un changement ponctuel sur un seul maillon de l'ADN pour transformer un cerveau d'*Homo erectus* en cerveau d'*Homo sapiens*. Ce changement était probablement une erreur, un raté dans les mécanismes de réplication de l'ADN chez un *Homo erectus* anonyme dont on ne saura sans doute jamais s'il a vécu en Afrique de l'Ouest, en Asie ou en Europe, et qui est le père des hommes dotés de cerveaux modernes. Mais cette erreur s'est révélée un réel avantage évolutif et s'est imposée.

Sébastien Bohler

M. Florio et al., *Science Advances*, vol. 2, e1601941, 2016

900 centimètres cubes

C'est le volume du cerveau d'*Homo erectus*, contre 1 400 centimètres cubes chez *Homo sapiens*.

Le cerveau de ce dernier est aussi très plissé, ce qui lui permet de contenir 86 milliards de neurones

Cosmologie

Une expansion de l'Univers un peu plus rapide ?

La collaboration internationale HOLiCOW, menée par Sherry Suyu, de l'institut Max-Planck d'astrophysique, à Munich, et à laquelle participent Vivien Bonvin et Frédéric Courbin de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, a utilisé les images de quasars déformées par des lentilles gravitationnelles pour estimer la constante de Hubble, qui mesure le taux d'expansion actuel de l'Univers.

Une galaxie massive déforme autour d'elle l'espace-temps et altère ainsi le parcours de la lumière venant d'un objet brillant en arrière-plan. L'image de cet objet lointain peut alors être amplifiée (d'où le nom de lentille gravitationnelle), déformée ou apparaître en plusieurs exemplaires. Dans ce dernier cas, les trajets correspondants de la lumière ne sont pas de la même longueur ; l'observateur détectera donc un éventuel changement de luminosité à des instants différents pour chaque image. En mesurant les délais, on peut alors calculer la constante de Hubble.



Une galaxie massive déforme l'espace-temps et crée un effet de lentille gravitationnelle. Les quatre points blancs qui l'entourent sont quatre images d'un même quasar situé en arrière-plan.

Les chercheurs de la collaboration HOLiCOW ont analysé les délais liés aux images de trois quasars, galaxies dont le noyau est très actif et dont la luminosité varie de façon aléatoire. Ils obtiennent une valeur de la constante de Hubble d'environ 71,9 kilomètres par seconde et par mégaparsec, en bon accord avec celle obtenue en 2016 par l'Américain Adam Riess et son équipe en déterminant les distances et les vitesses d'étoiles de type céphéïdes et de supernovæ.

Ces valeurs sont toutefois supérieures à celle (67,8) déterminée par la collaboration *Planck* en analysant le fond diffus cosmologique, la lumière émise par l'Univers quand il était âgé de 380 000 ans. La raison de la différence reste à élucider. Mais le fait de disposer désormais de trois méthodes différentes pour mesurer la constante de Hubble est, pour les cosmologistes, un bon point.

S. B.

V. Bonvin et al., *MNRAS*, 465(4), pp. 4914-4930, 2016

Samalás et le climat

Avec des collègues, Sébastien Guillet, de l'université de Berne, a analysé les effets climatiques de la violente éruption du grand volcan indonésien Samalás en 1257. L'explosion de la caldeira a projeté dans la stratosphère 40 kilomètres cubes de magma et deux fois plus d'aérosols sulfatés que l'éruption en 1815 du Tambora voisin, à l'origine de « l'année sans été ». On pensait que, comme l'explosion du Tambora, celle du Samalás avait refroidi le climat. En s'appuyant sur les archives historiques, sur les enregistrements climatiques issus des calottes de glace et sur la dendrochronologie, les chercheurs ont montré qu'en effet, les étés de 1258 et de 1259 ont été parmi les plus froids de tout le dernier millénaire, particulièrement au Japon, en Sibérie et en Europe occidentale. Mais l'Alaska et le nord du Canada ont au contraire bénéficié d'étés chauds. Un paradoxe que les chercheurs attribuent à un intense épisode d'El Niño.

Embryologie

Comment les organes internes se forment

L'embryogenèse est bien une histoire de mécanique. On savait que les mouvements des tissus induits par l'activation des gènes du développement régulent en retour la différenciation des tissus. Emmanuel Farge, à l'institut Curie, à Paris, et ses collègues viennent de prouver que des actions mécaniques activent aussi des mouvements de la morphogénèse. Ils ont montré chez la drosophile que la gastrulation – la formation de tubes précurseurs des organes internes – est déclenchée par des oscillations mécaniques.

Chez la mouche, le premier tube formé, le mésoderme, donne naissance à tous les organes

internes, hormis le tube digestif. Il apparaît grâce à l'accumulation d'une protéine, Myo-II, sous la membrane des cellules située vers l'extérieur de l'embryon. Cette protéine est un moteur moléculaire qui contracte la surface externe de l'embryon, laquelle se creuse jusqu'à former un tube. La contraction a lieu en deux étapes : au début, Myo-II n'est présente à la surface des cellules que sous la forme de petits spots instables qui produisent des pulsations aléatoires. Puis, avec la stabilisation des spots, la contraction se coordonne.

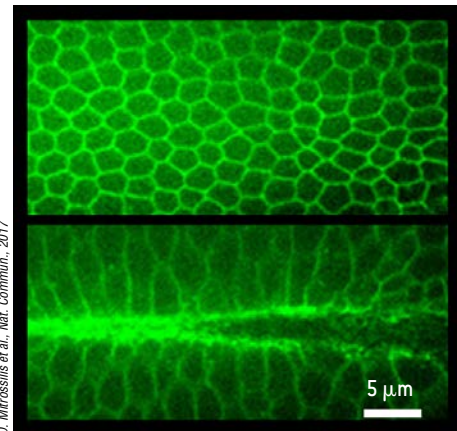
Chez un mutant où les pulsations sont inhibées et la formation du mésoderme est bloquée, les

chercheurs ont rétabli la gastrulation en imitant les premières pulsations à l'aide de vésicules magnétiques injectées dans les cellules et plongées dans des champs magnétiques oscillants. Myo-II s'est alors stabilisée à la surface externe des cellules et le mésoderme s'est creusé. De plus, l'équipe a montré que la déformation du mésoderme provoque la formation du tube gastrique.

La gastrulation, une étape commune à tout le règne animal, s'apparenterait donc à une cascade de dominos...

Marie-Neige Cordonnier

D. Mitrossilis et al., *Nature Commun.*, en ligne le 23 janvier 2017



Lors de la gastrulation, la surface de l'embryon (*en haut*) se courbe vers l'intérieur jusqu'à ce qu'elle forme un premier tube, le mésoderme (*en bas*), comme ici chez une drosophile.

L'énergie de l'or

Pour comprendre les propriétés de l'or, notamment sa couleur jaune, il faut prendre en compte des effets relativistes dans le calcul des niveaux d'énergie des électrons. Cependant, cela ne suffit pas pour calculer précisément l'énergie de première ionisation de cet atome, c'est-à-dire l'énergie minimale nécessaire pour en arracher un électron. Peter Schwerdtfeger, de l'université Massey, en Nouvelle-Zélande, et son équipe obtiennent un bon accord entre la théorie et la mesure expérimentale en prenant en compte des interactions impliquées jusqu'à cinq électrons.

Les archées d'Asgard

L'arbre du vivant a trois troncs : les bactéries et les archées sont des microorganismes simples, les eucaryotes peuvent être grands et complexes. Selon certains scénarios, archées et eucaryotes partageraient un ancêtre commun. En 2015, grâce à une analyse métagénomique, Thijs Ettema, de l'université d'Uppsala, et son équipe ont découvert Loki, une archée qui porterait des gènes aussi présents chez les eucaryotes. Par cette méthode indirecte, ces chercheurs ont trouvé trois cousines, qu'ils ont bien sûr nommées Thor, Odin et Heimdall ! Reste à les rencontrer pour confirmer leur génome.

ADN de tortue dans un trou

Sawmill Sink, un trou d'eau des îles Abacos, dans les Bahamas, avait conservé la carapace d'une tortue géante de l'espèce éteinte *Chelonoidis alburyorum*. Surprise : elle contenait encore tout son ADN, dont le séquençage a révélé une parenté avec la tortue d'Argentine *Chelonoidis chilensis* et avec la tortue géante des Galapagos *Chelonoidis vicina*. Les paléogénétiens en déduisent que les tortues ont immigré aux Caraïbes il y a 13 à 15 millions d'années, donc un peu plus de 10 millions d'années après que leur groupe ancestral des *Geochelone* est arrivé en Amérique en provenance d'Afrique.

Paléontologie

Des œufs de trilobites



© T. A. Hegna et al., Geology, 2017

Ce fossile de trilobite (*Triarthrus eatoni*) présente un groupe d'œufs sur le côté de la tête.

Du Cambrien à la fin du Permien, il y a environ 250 millions d'années, les trilobites ont dominé dans les mers. Avec plus de 18750 espèces décrites, ces arthropodes marins sont bien connus, mais on ignorait tout de leur reproduction. Or Thomas Hegna, de l'université de l'Illinois de l'Ouest, a annoncé la découverte, sur deux fossiles de trilobites vieux d'environ 450 millions d'années, de structures qui seraient des œufs.

Il s'agit de petits corps ovoïdes d'environ 0,16 millimètre de long groupés sur le côté de la tête par paquets de 3 à 9 (voir le cliché ci-contre). Sur les images tomographiques, on ne distingue aucun détail interne ni comment ces corps étaient attachés à la tête, mais on ne peut douter qu'ils l'étaient.

S'agit-il vraiment d'œufs ? Pour les chercheurs, ces formes ovoïdes localisées près de la tête ne peuvent guère être des fossiles de microorganismes, d'excréments ou de quelque passager clandestin. Leur taille correspond par ailleurs à celle constatée généralement sur des œufs d'arthropodes.

Un argument supplémentaire vient de la reproduction des limules, des arthropodes marins en forme de fer à cheval. Ce sont des animaux actuels, mais dont le type existe depuis 500 millions d'années. Or les limules portent leurs œufs non fécondés dans un réseau ovarien situé dans la tête.

F. S.

T. A. Hegna et al., *Geology*, vol. 45, pp. 199-202, 2017

Insolite

L'origine des cercles de fées

Dans le désert du Namib, le sol est constellé de zones circulaires régulièrement distribuées et dépourvues de plantes. Corina Tarnita, de l'université de Princeton, et ses collègues ont proposé une explication. Elle combine deux hypothèses considérées indépendamment jusque-là : la compétition entre des colonies de termites qui mangent les plantes et une compétition entre les plantes pour l'accès à l'eau, rare dans cette région.



© T. Coverdale et al., *Geology*, université Princeton

Viologie



Le puissant arsenal de guerre des bactériophages

Char d'assaut, corruption, agents dormants... Les stratégies des virus de bactéries sont bien plus complexes et variées qu'on ne le soupçonnait.

L'ingéniosité des bactériophages, des virus qui n'infectent que les bactéries, n'a pas fini de surprendre. Trois stratégies mises au jour révèlent à quel point ces entités s'apparentent à des machines de guerre bien rodées. La première concerne leur mode de reproduction. Comme tous les virus, les phages se multiplient en détournant la machinerie cellulaire de leurs hôtes. Mais la technique que Vorrapon Chaikerasitak, de l'université de Californie à San Diego, et ses collègues ont découverte chez un phage des bactéries *Pseudomonas* tient plus du char d'assaut que d'un simple parasitage. En observant l'invasion en détail, les biologistes ont montré que lors de sa réplication, le phage construit un compartiment qui ressemble à un noyau de cellule eucaryote.

Comme dans ces cellules, le compartiment renferme de l'ADN (l'ADN viral) ainsi que les protéines impliquées dans sa réplication et sa transduction en ARN. Les fragments d'ARN sortent alors de la structure et sont traduits en protéines qui serviront à fabriquer l'armature du virus hors du compartiment ou iront renforcer les troupes à l'intérieur. On connaissait des virus

produisant de tels compartiments dans des cellules eucaryotes, mais rien de tel n'avait été décrit chez les bactéries.

Une fois prête, la nouvelle armée de phages détruit la bactérie et se déploie. C'est là qu'intervient la deuxième stratégie. Elhanan Tzipilevich, de l'université hébraïque de Jérusalem, et ses collègues ont mis en évidence un mécanisme par lequel des phages infectent des bactéries qui leur résistaient. En mettant en présence des bactéries *Bacillus subtilis* sensibles à un phage et d'autres résistantes, ils ont montré que lorsqu'une armée de phages s'échappe d'une bactérie sensible, la membrane bactérienne détruite forme de petites vésicules. Or la bactérie doit sa sensibilité à un récepteur sur sa membrane, lequel se retrouve à la surface des vésicules. Lorsque les vésicules rencontrent une bactérie, elles fusionnent avec celle-ci, lui apportant le récepteur qui rend sensible au phage...

La troisième stratégie, elle, optimise la production des armées. Zohar Erez, de l'institut Weizmann, en Israël, et ses collègues ont montré en étudiant plus d'une centaine de phages que ceux-ci communiquent: lorsqu'un phage

infecte une bactérie, il produit un peptide ressemblant à ceux que sécrètent certaines bactéries pour communiquer. Chez les bactéries, la concentration en peptide renseigne chaque individu sur la densité de population de ses proches voisins. Le peptide viral renseigne les phages sur la densité de population de leurs congénères en utilisant les mêmes mécanismes que les peptides bactériens. Plus la concentration en peptide viral est élevée dans une bactérie (signe qu'il y a beaucoup de phages aux alentours), plus le phage qui l'attaque a tendance non pas à développer une armée, mais à insérer son ADN dans le génome bactérien, tel un agent dormant.

Au fil de l'évolution, les bactéries ont développé des défenses contre les inventions de leurs prédateurs. En retour, la sélection naturelle a favorisé chez les phages des stratégies qui les contournent. Dans cette course à la survie, une bactérie infectée et son virus tenteront peut-être un jour de cohabiter, produisant une minuscule cellule à noyau pérenne... Seront-ils les premiers à avoir essayé?

M.-N. C.

Science, vol. 355, pp. 194-197, 2017;
Cell, vol. 168, pp. 186-199, 2017;
Nature, vol. 541, pp. 488-493, 2017

Les bactériophages (ou phages), les virus des bactéries, attaquent leurs hôtes en injectant leur ADN à travers leur membrane. Au fil de l'évolution, ils ont développé de multiples mécanismes qui leur permettent de parer les défenses des bactéries, et dont trois ont été découverts récemment.

Climatologie

Les stocks de carbone au fil du Néolithique



© Christian Anret

Les tourbières (ci-dessus, une tourbière dans les Vosges), nombreuses dans l'hémisphère Nord, sont des pièges à matière organique. Elles constituent l'un des principaux puits de carbone naturels.

L'avènement de l'agriculture au Néolithique a-t-il influé sur le climat? Pas avant 1850, selon Benjamin Stocker, de l'École polytechnique fédérale de Zurich, et ses collègues. Ces chercheurs ont reconstitué le stock de carbone organique accumulé dans l'ensemble des terres émergées et dans les tourbières depuis le début de l'Holocène (les derniers 11 000 ans). Les tourbières constituant l'un des plus grands puits de carbone naturels, une augmentation de leur stock de carbone plus rapide que celle du stock total serait forcément due à une augmentation des émissions atmosphériques de dioxyde de carbone (CO₂).

Les chercheurs ont établi les courbes d'évolution de ces stocks au cours de l'Holocène à

l'aide d'une simulation du cycle du carbone dans l'écosystème et en exploitant les enregistrements climatiques naturels, puis ils les ont comparées à la courbe donnant le taux de CO₂ atmosphérique à travers l'Holocène. Qu'en ressort-il?

Après une rapide augmentation au sortir du Paléolithique, le taux de CO₂ atmosphérique diminue, passant par un minimum vers -7000 avant d'augmenter lentement jusqu'en 1850. Quant au stock de carbone accumulé dans les tourbières, il augmente de plus en plus vite tout au long de l'Holocène, alors qu'après -5000 le stock de carbone accumulé dans l'ensemble des écosystèmes terrestres n'augmente que lentement. Ainsi, après -5000 (âge du Bronze), on doit invoquer une forte émission de carbone dans l'atmosphère

pour expliquer l'augmentation du stockage dans les tourbières. L'émission océanique joue un rôle, mais ne suffit pas.

La différence s'explique-t-elle par l'activité humaine? En partie seulement: quel que soit le modèle de développement de l'agriculture employé, les chercheurs trouvent que les émissions d'origine agricole sont toujours très inférieures au total des émissions de CO₂ à travers tout l'Holocène. Une source manque et reste à trouver. Quoi qu'il en soit, une chose est claire: vers 1850, le taux de CO₂ atmosphérique explose, passant en 150 ans de 200 à 400 parties par millions....

F.S.

B. D. Stocker et al., PNAS, en ligne le 30 janvier 2017

Palais DÉCOUVERTE

les conférences

30 80

Entrée libre dans la limite des places disponibles

au Palais de la découverte

**Les mercredis à 19h,
du 1^{er} mars au 31 mai**

Cycle de 9 conférences

La recherche à l'horizon 2037

Depuis 1937, le Palais de la découverte se fait l'écho de la recherche scientifique. À l'occasion de ses 80 ans, il invite des chercheurs à se projeter en 2037. Avec notamment : Ph. Bihoux, J. Bobroff, M.-Ch. Schermann, E. Klein, ...

Mercredi 8 mars à 18h30

Journée de 3 conférences

1937-2037 : un siècle d'émergences technologiques

L'Académie des technologies célèbre les 80 ans du Palais de la découverte en évoquant un siècle d'émergences technologiques répondant à trois grands besoins de l'humanité : se soigner, se nourrir et transporter.

En partenariat avec  Avec le soutien de   

programme complet sur palais-decouverte.fr

Biologie végétale

Redonner du goût aux tomates

Les sélections et croisements successifs des variétés de tomates se sont accompagnés d'une perte de saveur. L'équipe de Harry Klee, de l'université de Floride, et Sanwen Huang, de l'académie chinoise des sciences agricoles, à Shenzhen, a entrepris une vaste étude pour mettre en évidence différents facteurs en jeu dans la saveur de ce fruit et esquisser des solutions.

À l'aide d'un panel de consommateurs, les chercheurs ont identifié 33 composés qui contribuent à une saveur appréciée. En comparant des variétés modernes et anciennes, ils ont montré que les concentrations de 13 composés volatils associés à la saveur sont réduites dans les variétés modernes. Un séquençage génétique sur près de 400 variétés a permis d'identifier des allèles moins efficaces dans la production de ces composés. De quoi aider à l'amélioration de ce fruit-légume abondamment consommé.

S. B.

D. Tieman et al., *Science*, vol. 355, pp. 391-394, 2017

Éthologie

Des fourmis bien orientées

Les fourmis ont un système de navigation interne qui leur permet de toujours savoir dans quelle direction et à quelle distance se situe leur nid. Ce système intègre diverses informations telles que la position du Soleil, leur nombre de pas, etc. La mémoire visuelle joue un rôle crucial, mais on la pensait égocentrique. En d'autres termes, on croyait que pour reconnaître la route qui mène à son nid, une fourmi devait toujours l'aborder avec la même orientation. Mais une équipe menée par Antoine Wystrach, de l'université Paul-Sabatier à Toulouse, en collaboration avec l'université d'Édimbourg, a montré que ces insectes se repèrent dans l'espace quelle que soit l'orientation de leur corps.

Ces chercheurs ont mis à l'épreuve cette capacité à s'orienter dans différentes expériences. Ainsi, des fourmis, « égarées » par les chercheurs ou forcées à rentrer en reculant, usent de différentes stratégies pour retrouver leur trajectoire : explorer les environs pour retrouver des éléments de leur mémoire visuelle, s'appuyer sur des repères dans le ciel. À partir de ce moment, elles sont capables de reconfigurer leur système de navigation pour rentrer, même en marche arrière !

Paco Nérin

S. Schwarz et al., *Current Biology*, en ligne le 19 janvier 2017

Chimie

Les secrets du gumtion révélés

À la fin du XIX^e siècle, les grands peintres britanniques, tel William Turner, ont adopté certaines innovations techniques. Ils ont, par exemple, utilisé un gel conçu par des chimistes qui donne à la peinture à l'huile des propriétés de structure et de séchage exceptionnelles. Laurence de Viguier, de l'université Pierre-et-Marie-Curie, et son équipe ont étudié ce matériau, nommé gumtion.

Les chercheurs ont reproduit des gumtions à la façon des maîtres de 1828 à 1839. D'après les recettes historiques, ce gel contient trois ingrédients principaux : du plomb (sous forme de diacétate ou d'oxyde), du mastic (résine de *Pistacia lentiscus*, un arbuste méditerranéen) et une huile végétale siccative (qui sèche en durcissant). Ces préparations présentent des propriétés mécaniques intéressantes, mais c'est lorsqu'on les mélange avec la peinture à l'huile qu'on obtient

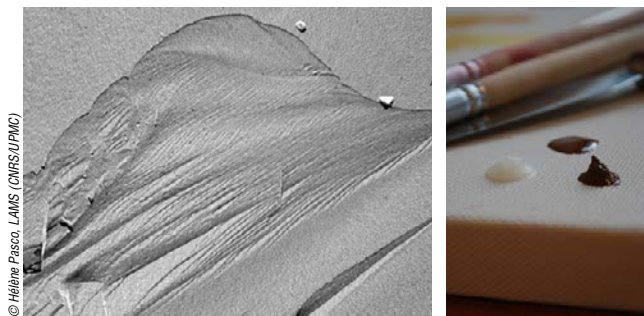
un matériau exceptionnel : un gel très élastique qui conserve sa forme lorsqu'on l'applique sur un support. Le peintre peut alors jouer avec des effets de textures, produire des reliefs par « empâtement », ce qui était particulièrement laborieux sans gumtion, la peinture étant trop fluide.

Les chercheurs ont montré comment une suite de processus chimiques, amorcés par le diacétate de plomb, conduisent à une réticulation du matériau, c'est-à-dire la formation de multiples liaisons entre les chaînes polymériques, qui confère au mélange sa structure gélifiée.

Ce type de médium est encore commercialisé sous l'appellation « médium gel ». Sa composition est proche des recettes du XIX^e siècle, mais le plomb a été remplacé par d'autres métaux, supposés moins toxiques.

Martin Tiano

Angew. Chem. Int. Ed., vol. 56(6), pp. 1619-1623, 2017



Le gel, vu au microscope électronique (à gauche). Sa structure lui permet de garder du volume (en blanc, à droite). Ainsi, une goutte de peinture-gel ne s'étale pas, contrairement à la peinture seule.

Les parasites du loup allemand

En Allemagne, le nombre d'espèces de parasites par individu a crû chez les loups depuis 2000, c'est-à-dire depuis leur arrivée dans les confins allemands et polonais en provenance des pays baltes. Ines Lesniak, de l'institut Leibniz à Berlin, l'a constaté en disséquant au fil des ans 53 cadavres de loups adultes. Cela traduit le fait que la population germano-polonaise de loups a acquis la diversité des parasites des cervidés, animaux qu'elle chasse dans les forêts où elle s'est installée.

Des voyelles chez les babouins

Chez l'homme, le larynx est en position basse, et on a longtemps pensé que c'était la clé de ses facultés vocales sophistiquées – et donc de son langage. Mais l'équipe de Joël Fagot, du CNRS, vient de remettre en cause cette idée en montrant que les babouins, dont le larynx est haut,

produisent au moins cinq sons comparables à des voyelles. Les premiers protolangages sont donc peut-être apparus bien plus tôt qu'on ne le pensait, puisque notre dernier ancêtre commun avec ces singes, qui vivait il y a 25 millions d'années, avait probablement déjà les capacités articulatoires nécessaires.

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



Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

POINT DE VUE

Les brevets sur les plantes mettent en danger le modèle agricole européen

Si l'Europe décide que les plantes issues des nouvelles biotechnologies ne sont pas des OGM, elle va ouvrir grand ses marchés aux plantes brevetées, favorisant la concentration des industries semencières et les monocultures intensives.

Frédéric THOMAS

Il y a une dizaine d'années, la Commission européenne a nommé un groupe d'experts chargé d'évaluer si les plantes issues d'une nouvelle génération de biotechnologies sont des organismes génétiquement modifiés (OGM) et s'il faut donc encadrer leur mise sur le marché comme telles. Depuis, d'autres techniques, telle CRISPR-Cas, ont rejoint cette nouvelle génération (voir l'encadré page 16), mais la question, elle, n'est toujours pas tranchée.

Derrière ce débat très technique pointe un enjeu social, économique et culturel de taille : sommes-nous prêts à ouvrir nos marchés sans aucun garde-fou aux plantes issues de ces nouvelles technologies qui seront, comme les OGM, des plantes protégées par brevet, produisant les mêmes effets de concentration des marchés et de renforcement des systèmes de monoculture ?

Dans l'état actuel des débats, l'Europe devrait reconnaître que la plupart des plantes issues de ces nouvelles biotechnologies sont des OGM, mais en plaçant ces techniques à l'annexe 1B de la directive européenne 2001/18/CE. Ces plantes seraient ainsi exclues du champ d'application de la directive et seraient mises sur le marché non seulement sans aucune évaluation de leurs risques pour l'environnement et la santé humaine, mais aussi sans aucune régulation juridique. Si l'Europe et la France poursuivent dans cette direction, les plantes protégées par brevets vont déferler

sur nos marchés. Et le système de protection intellectuelle jusqu'ici préféré – l'UPOV, l'Union internationale pour la protection des obtentions végétales – va vite devenir obsolète. Autant de mauvaises nouvelles tant pour la diversité de nos systèmes d'innovation que pour l'accès aux ressources génétiques, la diversité des types de variétés cultivées et la diversité de nos systèmes agraires et alimentaires européens.

Que connaît-on déjà des effets des plantes brevetées sur l'économie des semences ? L'amélioration des plantes a longtemps été un secteur économique très peu concentré avec des petits marchés segmentés, occupés par de nombreuses petites et moyennes entreprises (PME) développant de multiples formes de partenariats avec les instituts de recherche publique et mettant sur le marché

Les traits protégés par des brevets ont vocation à conquérir des marchés de dimension mondiale

des types variétaux relativement diversifiés. Il en a résulté un maintien de la pluralité des systèmes d'innovation et, par conséquent, une relative diversité des variétés proposées sur des marchés de taille moyenne correspondant aux différentes unités agroécologiques et climatiques de chaque pays, de chaque région...

L'arrivée des OGM brevetés a bouleversé cette structuration, car les brevets sont de formidables instruments de concentration. En 2013, une étude du Commissariat général à la stratégie et à la prospective en France a montré que seulement dix grandes firmes multinationales contrôlent 60 % du marché mondial des semences. À l'exception du Français Limagrain, de l'Allemand KWS, du Japonais Sakata et du Danois DLF Trifolium, ces groupes sont tous de l'industrie chimique : les Américains Monsanto, DuPont Pioneer, Dow, Windfield Solution, et les Allemands Bayer et BASF.

Cette récente concentration est le résultat direct du recours aux brevets. Par exemple, tout élément qui constitue une innovation, au sens du droit des brevets, dans une séquence d'ADN ou d'ARN peut être breveté. En pratique, les brevets portent sur des gènes d'intérêt qui sont *a priori* insérables dans n'importe quelle variété d'une même espèce, voire dans plusieurs espèces, surtout lorsqu'il s'agit d'un gène de résistance à un herbicide dont l'efficacité est universelle. Les traits protégés par des brevets ont donc vocation à conquérir des marchés de dimension mondiale. Cette concentration croissante et accélérée a été identifiée en 2013 comme préoccupante par le Comité économique, éthique et social du Haut Conseil des biotechnologies (HCB), car elle met en péril ce qui reste de la diversité de nos systèmes d'innovation et, *in fine*, de la diversité des variétés cultivées.

Jusqu'à présent, les marchés européens des semences ont peu senti les effets de cette concentration, car les plantes protégées par brevets sont essentiellement des OGM. Or les OGM sont peu implantés en Europe. Seul l'événement MON810 de Monsanto (rendant les maïs résistants au RoundUp) est autorisé par l'Union européenne, et encore 17 pays sur 28, dont la France, interdisent la culture des variétés de maïs possédant cette modification. C'est précisément ce que les plantes brevetées issues des nouvelles biotechnologies risquent de changer si elles sont mises sur le marché sans aucune réglementation.

D'après l'Office européen des brevets (OEB), 1 927 brevets sur des plantes génétiquement modifiées ont été déposés en 2014 à l'OEB, contre seulement 170 sur des plantes non génétiquement modifiées. Quelles sont ces plantes non génétiquement modifiées brevetées et déjà présentes sur les marchés européens ? Il s'agit principalement de deux types de variétés : des variétés mutées tolérantes à des herbicides et des plantes obtenues par des techniques tout à fait classiques, mais qu'un certain dévoiement de la directive européenne 98/44/CE sur les biotechnologies permet de breveter.

Les variétés mutées tolérantes aux herbicides se sont vite diffusées sur les marchés européens pour un certain nombre d'espèces. BASF et DuPont, par exemple, possèdent de nombreux brevets sur des traits de résistance à leurs herbicides pour des espèces de grande culture telles que le colza et le tournesol. Les inventions brevetées consistent essentiellement en des résistances aux herbicides de ces compagnies, comme dans un OGM classique. Les brevets décrivent la façon dont ces résistances sont obtenues. Les revendications des brevets sont ensuite très larges et portent toujours sur la séquence d'ADN mutée. Les multinationales de l'agrochimie intègrent ensuite ces traits brevetés soit dans les variétés qu'elles sélectionnent elles-mêmes, soit dans celles des PME de sélection semencière.

C'est ce que fait BASF en France avec sa technologie Clearfield (*voir la photo ci-dessus*). Les grandes firmes de l'agrochimie ne sont pas agressives – BASF percevrait moins de 10 % sur les ventes des variétés Caussade portant le trait Clearfield. Leurs stratégies



© Klagyivik Viktor/Shutterstock.com

LA FIRME BASF a introduit sa technologie brevetée Clearfield, qui rend les tournesols résistants à son herbicide, dans les variétés de quasiment toutes les principales entreprises semencières françaises (Caussade Semences, Maisadour, Euralis, Ragt, Limagrain) en développant des partenariats avec elles. Une façon de prendre le contrôle du secteur...

consistent avant tout à faire les yeux doux aux sélectionneurs afin qu'ils insèrent les traits brevetés dans leurs variétés. C'est ainsi que Monsanto a conquis le marché brésilien du soja, non pas en vendant ses variétés d'OGM, mais en intégrant ses traits brevetés dans les variétés des semenciers brésiliens... avant d'en prendre le contrôle. En somme, les firmes multinationales de l'agrochimie sont en train de réussir avec les variétés mutées tolérantes aux herbicides ce qu'elles n'ont pas pu faire avec les OGM sur les marchés européens.

À côté de ces variétés mutées, de plus en plus de plantes obtenues par des méthodes classiques de sélection sont désormais brevetées. La pratique consiste à breveter une plante par un brevet de produit en décrivant son procédé d'obtention, même si ce procédé, essentiellement biologique, est non brevetable en théorie, selon la directive européenne 98/44. En d'autres termes, le brevet protège la plante en tant que telle, décrite par son procédé d'obtention. L'argument consiste à dire que ce n'est pas parce que la loi interdit de breveter « les procédés essentiellement biologiques » que « les produits » qui en sont issus ne sont pas brevetables, y compris s'il s'agit de variétés au sens de l'UPOV.

■ L'AUTEUR



Frédéric THOMAS est historien des sciences et des techniques, chargé de recherche à l'Institut de recherche pour le développement (IRD), au sein de l'UMR Patrimoines locaux, au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris.

OGM ou non ?

Selon la directive 2001/18/CE, un OGM est « un organisme, à l'exception des êtres humains, dont le matériel génétique a été modifié d'une manière qui ne s'effectue pas naturellement par multiplication et/ou par recombinaison naturelle ». Ainsi, les techniques de transgénèse, c'est-à-dire où un fragment d'ADN étranger est introduit, sont soumises à la réglementation sur les OGM. L'annexe 1B, cependant, exclut la mutagenèse du champ d'application de la directive. Cette technique consiste à modifier le génome d'une plante en l'exposant à des agents chimiques, physiques (rayons X) ou sélectifs (herbicide), ou à l'aide de petits fragments d'ADN mutés insérés dans la cellule. Ces dernières années, de nouvelles techniques d'obtention des plantes sont apparues, telle CRISPR-Cas, où une enzyme reconnaît une séquence spécifique d'ADN et la coupe pour y insérer ou non un fragment d'ADN. De forts lobbies poussent pour que ces techniques figurent aussi dans l'annexe 1B.

■ BIBLIOGRAPHIE

M.-A. Hermitte, *L'Emprise des droits intellectuels sur le monde vivant*, Quæ, 2016.

F. Girard, 'Though the treasure of nature's germens tumble all together': the EPO and patents on native traits or the bewitching powers of ideologies, *Prometheus*, vol. 33, pp. 43-65, 2015.

F. Girard et C. Noiville, *Biotechnologies végétales et propriété industrielle*, La documentation française, 2014.

C. Bonneuil et F. Thomas, *Gènes, pouvoirs et profits*, Quæ, 2009.

Si fallacieux qu'il paraisse, ce raisonnement est celui que la Grande chambre des recours, l'organe judiciaire le plus élevé de l'Office européen des brevets, a tenu, le 25 mars 2015, dans les affaires Brocoli II et Tomate ridée II. Ces variétés ont été brevetées alors qu'elles avaient été obtenues par des méthodes classiques, et ce malgré les multiples pressions des mouvements antibrevets, rejoints, pour une fois, par le HCB.

Cette expansion du champ d'application des brevets sur les innovations variétales est le résultat d'une volonté délibérée de l'Office européen des brevets de vider de leur contenu les différentes exclusions des organismes vivants du champ des brevets – exclusions initialement inscrites dans les accords internationaux sur la protection des droits intellectuels et transcrites dans la directive européenne 98/44/CE.

De forts lobbies à l'Office européen des brevets

La Commission européenne et l'Office européen des brevets présentent souvent ces évolutions comme inéluctables. Il s'agirait de suivre la politique américaine en matière de brevet pour que l'Europe ne décroche pas complètement en matière de biotechnologies. En fait, l'Office européen des brevets est aujourd'hui un organisme hors de tout contrôle démocratique et fortement pénétré par les lobbies industriels *via* son Comité consultatif permanent, essentiellement composé de représentants de l'industrie. Il affiche de nombreuses exceptions à la brevetabilité, notamment d'ordre éthique, tout en s'évertuant ensuite à les vider de leur contenu. Il a ainsi « créé dans la société civile un sentiment de manipulation par le politique qui, tout en revendiquant une façade éthique, s'affranchit en pratique de la plus grande partie des contraintes », constate Marie-Angèle Hermitte, juriste spécialiste de ces questions, dans un récent ouvrage.

S'orienter vers une déréglementation de la mise sur le marché des plantes issues des nouvelles biotechnologies, c'est renforcer encore l'impact de cette économie des brevets et, par conséquent, accélérer la remise en cause de notre modèle agricole européen fondé sur une diversité des types de variétés présents sur nos marchés. Ceci relie la question du statut juridique de ces nouvelles biotechnologies à la nouvelle directive européenne 2015/412. Cette directive permet désormais aux États membres de l'Union

européenne d'interdire la culture de plantes génétiquement modifiées pour des motifs autres que sanitaires et environnementaux, comme les impacts socioéconomiques de ce type de plantes sur les orientations ou les modèles agricoles de chaque Nation, mais à condition de montrer que ces mesures ne sont pas discriminatoires contre les OGM. Or en pratique, il sera très difficile d'interdire ces plantes sans avoir de solides preuves de leurs impacts négatifs sur des orientations agricoles spécifiques telles que l'agroécologie, comme l'a montré le colloque international sur le sujet organisé en octobre 2016 par le HCB. Si les plantes issues des nouvelles biotechnologies n'entrent pas dans le champ d'application de cette nouvelle directive, il deviendra définitivement illusoire de protéger nos modèles agricoles contre ces technologies favorisant au contraire les modèles productivistes.

En 2013, le groupe de travail du HCB sur les biotechnologies végétales et la propriété industrielle avait alerté les pouvoirs publics sur les risques de renforcement de l'oligopole de l'agrochimie pour nos orientations agricoles. À sa suite, le Conseil économique éthique et social du HCB avait souligné les dangers des brevets pour la recherche en amélioration des plantes et l'innovation variétale, s'inquiétant notamment que « les programmes de sélection ne [puissent] être entrepris sans risque, pour le sélectionneur, d'intégrer à son insu des éléments brevetés ». Et dans son rapport de 2013, le Commissariat général à la stratégie cité plus haut avait à son tour affirmé, en des termes politiques plus forts encore, que « l'Europe doit lutter contre l'instrumentalisation du brevet comme outils de guerre juridique pour bloquer l'innovation, et ce faisant, la liberté de production ». À la fin du printemps, le HCB devrait rendre son rapport final sur les nouvelles techniques d'obtention des plantes. Souhaitons qu'il se souvienne de ces conclusions. On ne peut, d'un côté, mettre en garde contre les brevets sur les plantes et, de l'autre, prétendre que les plantes issues des nouvelles biotechnologies doivent échapper aux réglementations sur les OGM. Et souhaitons aussi que la société civile s'empare vite de ces questions : il est plus que temps de remettre en cause l'emprise des brevets sur le vivant. ■



Réagissez au
Point de vue sur
www.pourlascience.fr

ENTREPRISES, COLLECTIVITÉS, FINANCEZ VOS BESOINS DE RECHERCHE,

DANS LES DOMAINES DES PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES, DES SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT
ET DE LA VIE, DES SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES



Dans le cadre d'un partenariat entre un étudiant, son laboratoire d'accueil et vous,
l'ADEME vous aide à produire des connaissances nouvelles et renforce les capacités humaines
de votre R&D en finançant un doctorant pendant 3 ans !

ENSEMBLE POUR CONSTRUIRE UN MONDE PLUS DURABLE

www.ademe.fr/theses



CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES par Gérald Bronner



Pourquoi les chantiers sont-ils toujours en retard ?

La réponse à cette question réside au moins en partie dans le biais de perception des probabilités composées.

Le 11 janvier 2017, le magnifique bâtiment de la Philharmonie de Hambourg était inauguré par un magistral concert. Mais que d'imprévus avant d'en arriver là ! L'édifice devait ouvrir ses portes sept ans plus tôt et a fini par coûter dix fois plus cher qu'attendu initialement. Faut-il mettre sur le compte de la coïncidence le fait que le bâtiment de la Philharmonie de Paris a pris lui aussi un retard considérable, ou encore que le coût du nouveau Parlement écossais, à Édimbourg, estimé d'abord à 40 millions de livres, en a finalement coûté 431 millions ?

Les professionnels le savent, les chantiers sont généralement en retard et coûtent plus cher que les devis établis. On peut rager contre les responsables ou la malchance. On peut aussi se demander : et si les coups du sort qui paraissent s'acharner sur ces vastes chantiers n'en étaient pas vraiment ?

Prenons un tout petit peu de hauteur. Ce type de projets ne peut être achevé qu'en respectant de nombreuses conditions : pas de retard dans la livraison du matériel, pas de météo trop défavorable, pas de mouvements sociaux, etc. Dans l'esprit de ceux qui ont à juger du calendrier de tels projets, la probabilité de rencontrer chacun de ces problèmes séparément est suffisamment faible pour inciter à l'optimisme.

Cet optimisme est en réalité déraisonnable, car la probabilité qu'un projet se réalise sans encombre est la probabilité conjointe de la non-réalisation de chacun de ces événements. En d'autres termes, il aboutira dans les temps si telle condition est remplie, et telle autre,

et telle autre, etc. Or l'esprit humain est mal équipé pour bien évaluer cette structure de probabilités composées : il a tendance à les surestimer largement.

Il y a plusieurs années, j'avais interrogé plus de 700 personnes avec le problème suivant : « Jean doit aller du point A au point B. Pour ce faire, il doit éviter quatre obstacles,



PHILHARMONIE DE HAMBURG : sept ans de retard, et un coût dix fois supérieur à celui prévu initialement.

et il a 80 % de chances d'éviter chacun des obstacles. Combien a-t-il de pourcentage de chances d'arriver au point B en évitant tous les obstacles ? » Malgré la simplicité du problème et de son résultat ($0,8^4 = 0,41$, soit 41 %) la plupart des sujets surestimaient les chances de Jean en considérant en moyenne qu'il avait 60 % de chances de franchir tous les obstacles [50,8 % des sondés ont même considéré qu'il avait 80 % de chances de ne rencontrer aucun problème, le résultat

n'étant, selon eux, pas modifié par le nombre d'obstacles].

Ces réponses me paraissent une piste pour comprendre pourquoi tous les projets impliquant un nombre plus ou moins élevé d'étapes souffrent d'un retard ou d'un surcoût notables. Ainsi, puisque nous posons rarement sur papier les probabilités (même grossièrement évaluées) associées à chacune de ces étapes, nous pouvons aisément avoir l'impression que le projet sera réalisé dans les temps.

Mais, pourrait-on objecter, ces retards ne sont-ils pas plutôt dus au fait que ceux qui remportent les appels d'offres sous-estiment le coût de leur devis afin d'emporter le marché ? Si c'était le cas, on ne comprendrait pas pourquoi ce type de sous-estimations probabilistes leste de la même manière les prévisions relatives à des chantiers plus modestes n'impliquant pas d'enchères publiques. Par exemple, plusieurs études portant sur les dépenses des familles souhaitant refaire leur cuisine ont montré que les montants réels étaient très supérieurs à la première estimation.

Une façon simple de lever ce problème serait de pondérer nos attentes par un coefficient intégrant l'existence de ce biais de perception des probabilités composées. Les grands bâtiments ne seraient pas pour autant achevés plus rapidement, mais cela atténuerait la déception due au retard et à l'augmentation des coûts qui caractérisent ces entreprises de grande envergure. ■

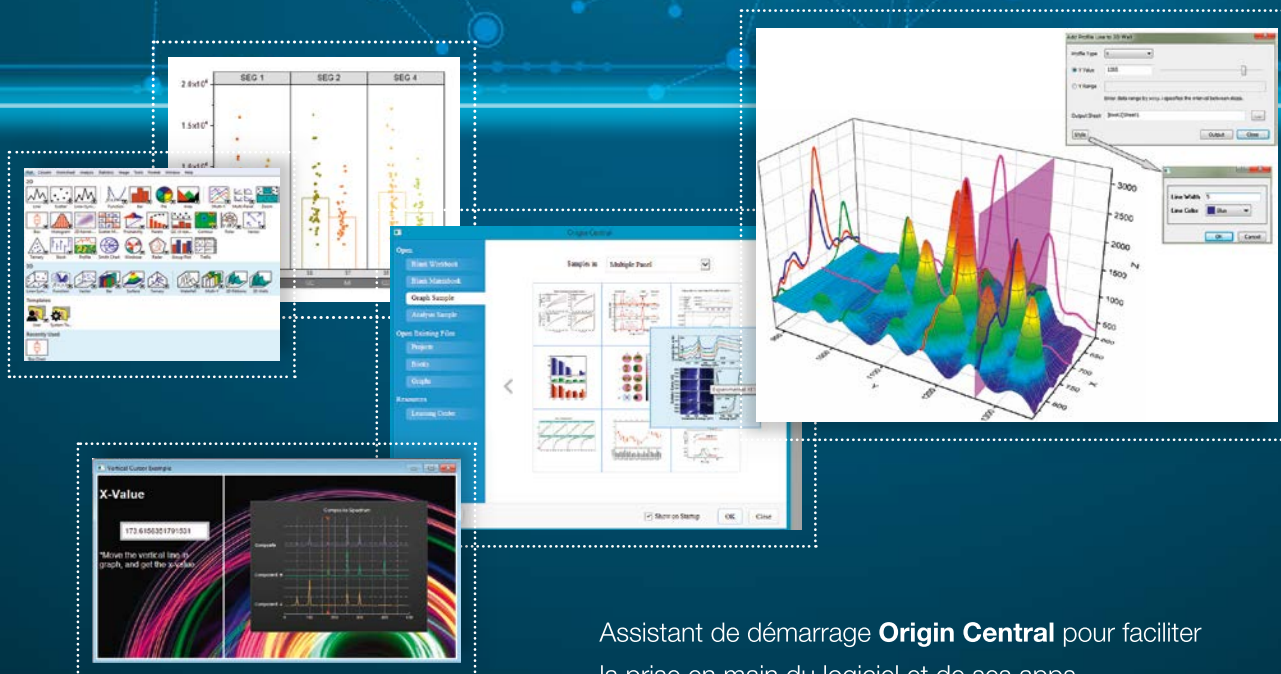
Gérald BRONNER est professeur de sociologie à l'université Paris-Diderot.

UNE INTERFACE REPENSÉE ET DES POSSIBILITÉS DÉMULTIPLIÉES



ORIGIN[®] 2017

Graphing & Analysis



Assistant de démarrage **Origin Central** pour faciliter la prise en main du logiciel et de ses apps
Nouvelles **applications** dans le User File Exchange
Classeurs ou books plus intuitifs et proches de **Microsoft Excel[®]**
Customisation possible en **HTML / CSS** pour produire des rapports de qualité
Encore plus de personnalisation des **graphes**



NOUVELLE VERSION ORIGIN 2017

ritme.com/origin

Tél. : +33 (0)1 42 46 00 42

Distributeur officiel en France

RITME
SCIENTIFIC SOLUTIONS

HOMO SAPIENS INFORMATIcus chronique de Gilles Doweck

Spoutnik 2.0 : il faut relancer l'enseignement des sciences

Alors que nous vivons une révolution scientifique et technique, l'enseignement accuse un grave retard dans ces domaines.



Le 4 octobre 1957, l'Union soviétique lançait le premier satellite artificiel de la Terre, *Spoutnik 1*. En pleine guerre froide, cette défaite technique a provoqué un véritable traumatisme aux États-Unis et en Europe de l'Ouest.

La riposte de ces pays a alors été notamment de rénover l'enseignement des sciences et des techniques, qui avait tardé à incorporer les mutations de la première moitié du XX^e siècle, afin d'améliorer, à grande échelle, les connaissances de la population, et rattraper les Soviétiques. Dans les années 1960, l'enseignement des sciences et des techniques est devenu une priorité, ce qui a effectivement aidé les Américains et les Européens à combler leur retard. Une fois l'objectif atteint, cet enseignement a hélas perdu, peu à peu, son caractère prioritaire, notamment en France, pour devenir ce qu'il est aujourd'hui.

Nous vivons pourtant une révolution scientifique et technique beaucoup plus profonde que celle des années 1950 et 1960. Les ordinateurs, les robots et les algorithmes remplacent peu à peu les humains pour effectuer des tâches de plus en plus complexes. Le travail perd progressivement la place centrale qu'il occupait dans la production de richesses. Le profit engendré par cette production est ainsi de moins en moins distribué aux détenteurs d'une force de travail et de plus en plus aux propriétaires et aux concepteurs de ces ordinateurs, ces robots et ces algorithmes. Et ces concepteurs ne sont pas seulement des *digital natives*, qui ont grandi avec l'informatique et épâtent leurs grands-parents en postant une photo sur un

réseau social, mais ceux qui, en Amérique et surtout en Asie, ont reçu en plus un enseignement scientifique et technique de qualité.

Relancer, comme il y a soixante ans, l'enseignement des sciences et des techniques n'est pourtant pas si difficile. La première chose à faire est d'augmenter, peu à peu, le volume horaire consacré aux sciences et aux techniques à l'école, au collège et au lycée. Aujourd'hui,



un élève de quatrième y consacre huit heures hebdomadaires, soit moins du tiers de son temps scolaire. De toute évidence, les humanités ont un rôle à jouer dans ce renouveau : l'histoire des sciences et des techniques est trop négligée dans les programmes d'histoire. De même, la philosophie des sciences et des techniques est délaissée dans les programmes de philosophie, alors que, par exemple, les nouvelles questions éthiques posées par la révolution informatique abondent.

Il faut aussi introduire un enseignement des sciences et des techniques dans les Écoles

supérieures du professorat et de l'éducation, qui forment les professeurs des écoles. Car il faut commencer à se construire une culture scientifique dès le plus jeune âge, ce qui est illusoire si les professeurs des écoles n'ont pas eux-mêmes une telle culture.

Un effort doit être mené pour recruter davantage de professeurs de sciences et techniques au collège et au lycée en leur proposant, dès le début de leurs études, de s'orienter vers les métiers du professorat, comme cela se faisait entre 1957 et 1979. Parmi ces nouveaux professeurs, il est important de recruter un nombre important de professeurs d'informatique, en créant des concours de recrutement spécifiques.

Enfin, il est crucial de rénover les enseignements. Cette mise à jour doit s'appuyer sur une analyse des transformations de l'architecture des sciences et techniques dans la seconde moitié du XX^e siècle. Analyse que l'Académie des sciences, les sociétés savantes, l'association La Main à la Pâte, etc. ont conduite et à laquelle les différents ministres qui se sont succédé depuis une ou deux décennies sont, pour l'essentiel, restés sourds.

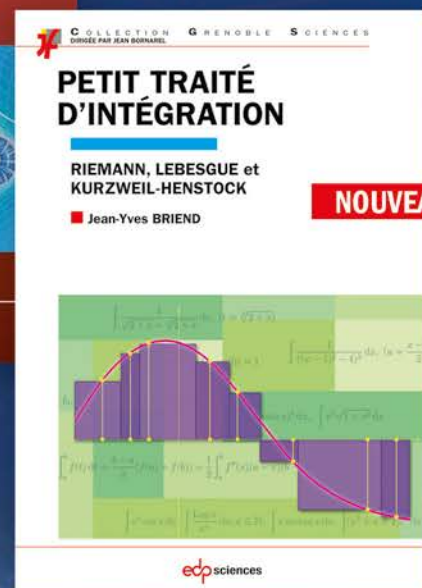
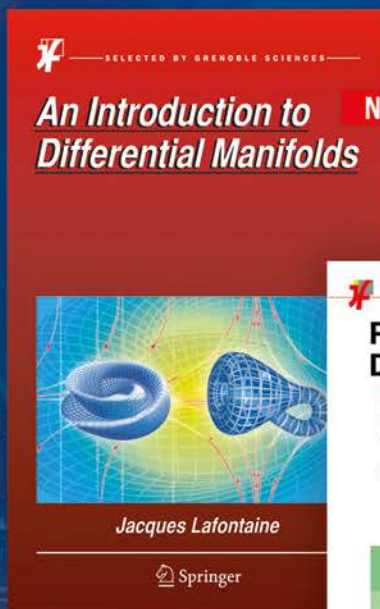
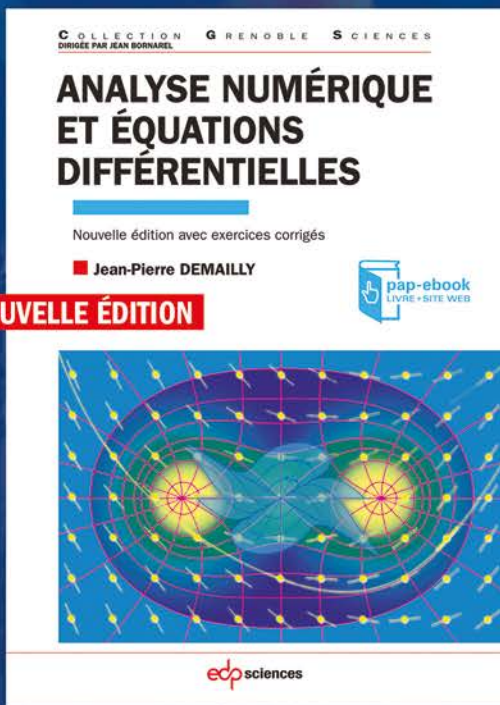
Plus que tout, il importe que la ou le prochain président de la République nomme une ou un ministre de l'Éducation nationale qui s'approprie pleinement les enjeux scientifiques, techniques, économiques et sociétaux de notre époque. ■

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

GRENOBLE SCIENCES

■ CONSEIL ■ EXPERTISE ■ LABELLISATION ■ ÉDITION

■ La nouvelle édition
enfin en librairie



■ Découvrez nos autres titres labellisés ...



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 Grenoble Alpes, Bât. B de Phitem,
230 rue de la Physique – CS 40700 38058 Grenoble cedex 9
Tél. (33)4 76 51 46 95

Email : Grenoble.Sciences@ujf-grenoble.fr

AUVERGNE – RhôneAlpes



Le Système solaire, une exception née du chaos

JUPITER, dans sa prime jeunesse (*au premier plan*), évoluait dans le disque protoplanétaire de poussières et de gaz entourant le Soleil (*au fond*). Cette planète géante a sans doute joué un rôle crucial dans le Système solaire.

Konstantin Batygin, Gregory Laughlin et Alessandro Morbidelli

Les premiers âges du Système solaire se caractérisent par des planètes vagabondes aux orbites instables et des collisions planétaires destructrices. Ce chaos a engendré un système qui, comparé aux autres systèmes planétaires découverts, constitue une anomalie.

L'ESSENTIEL

- Loin d'être la norme, la configuration actuelle du Système solaire, avec ses planètes internes rocheuses et ses géantes gazeuses externes, est atypique en comparaison de la plupart des autres systèmes planétaires.
- Les récentes simulations numériques et l'étude des exoplanètes suggèrent que les débuts du Système solaire ont été violents et chaotiques.
- Jupiter et Saturne ont connu des changements d'orbite il y a des milliards d'années.
- Lors de ces migrations, les géantes gazeuses auraient poussé des planètes vers le Soleil ou, plus probablement, vers l'espace interstellaire.

© Kenji Brown Morbidelli Studios

Il y a quelques années, telle que nous la concevions, l'histoire de la naissance du Système solaire était assez simple et dénuée d'événements spectaculaires. Elle commence il y a près de 4,5 milliards d'années, avec un nuage sombre de gaz et de poussière en rotation. Le nuage s'est effondré sur lui-même sous l'effet de sa propre gravité. Le Soleil s'est formé en son centre et, petit à petit, huit planètes, ainsi que des objets plus modestes tels que Pluton, ont émergé du reste de gaz et de poussières qui tourbillonnait autour de l'étoile. Depuis, le Système solaire effectue un ballet aux mouvements aussi précis et prévisibles que ceux d'une horloge.

Mais ces dernières années, les astronomes ont commencé à glaner des indices subtils faisant mentir ce scénario bien rodé. Comparé aux milliers de systèmes exoplanétaires nouvellement découverts, le Système solaire a des caractéristiques peu fréquentes. Sa structure, avec ses petites planètes internes rocheuses, ses géantes gazeuses externes et l'absence de planètes plus proches du Soleil que Mercure, est parfaitement atypique. Grâce à des simulations numériques, les astronomes commencent à comprendre que ces entorses à la règle sont le résultat d'une jeunesse turbulente.

De fait, la nouvelle histoire du Système solaire est beaucoup plus mouvementée et chaotique qu'on ne l'imaginait: il y est question de planètes errantes évincées de leur lieu de naissance, de corps précipités dans le Soleil et de géantes solitaires expulsées dans les confins glacés du Système solaire. En étudiant ces événements anciens et les cicatrices qu'ils ont laissées, les astronomes ont brossé un tableau cohérent des époques cruciales de la formation de ce système.

Reprenons d'abord l'ancienne vision du Système solaire dès ses débuts, lors de la formation du Soleil. Celle-ci s'est déroulée au cœur d'un nuage moléculaire géant de gaz et de poussière

ayant une masse de l'ordre de 10 000 fois celle du Soleil. Une zone dense au sein du nuage s'est effondrée sur elle-même, formant au centre une protoétoile – le jeune Soleil –, entourée d'un immense anneau de gaz et de poussière opaque, le disque protoplanétaire.

Pendant des décennies, les théoriciens ont pensé que les propriétés du disque protoplanétaire suffisaient pour expliquer l'une des principales caractéristiques du Système solaire : la répartition de son cortège, d'abord les quatre planètes telluriques rocheuses, puis, sur des orbites plus lointaines, les quatre géantes gazeuses.

Un processus universel explique la formation de ces deux variétés de planètes. Dans le disque gazeux et turbulent, des grains de poussière entrent en collision et se collent les uns aux autres jusqu'à former des objets de taille kilométrique nommés planétésimaux. Ceux-ci s'apparentent aux moutons de poussière formés par les courants d'air et les forces électrostatiques sur un sol non balayé. En un million d'années environ, le disque protoplanétaire du Système solaire regorgeait de planètes embryonnaires de la taille de la Lune.

La plupart de ces corps se trouvaient au-delà de l'actuelle ceinture d'astéroïdes, et au-delà de la « ligne de glace », qui indique la région suffisamment éloignée de la chaleur du jeune Soleil pour qu'il subsiste de la glace d'eau dans le disque. Par conséquent, au-delà de la ligne de démarcation, les planètes embryonnaires pouvaient se repaître de glace en abondance et ainsi atteindre des tailles énormes. Par ailleurs, les plus gros de ces corps étaient aussi ceux qui grossissaient le plus vite. Leur champ gravitationnel, plus intense, accumulait la plus grande part de la glace, du gaz et de la poussière disponibles dans le disque environnant. En un million d'années seulement, l'embryon le plus goulu était devenu la planète Jupiter.

Pour les planétologues, la dichotomie de l'architecture du Système solaire s'est jouée à cette période. Devancées par Jupiter, les autres planètes géantes sont plus petites parce que leur croissance a été plus lente, la quantité de gaz disponible ayant déjà été très réduite par Jupiter au moment où leur attraction gravitationnelle a pris vraiment de l'importance. Les planètes internes étaient encore beaucoup plus petites parce que nées à l'intérieur de la ligne de glace, là où le disque était relativement appauvri en matière solide.

■ LES AUTEURS



Konstantin BATYGIN est maître de conférences en planétologie à l'institut de technologie de Californie, aux États-Unis.



Gregory LAUGHLIN est professeur d'astronomie et d'astrophysique à l'université de Californie à Santa Cruz, aux États-Unis.



Alessandro MORBIDELLI est planétologue à l'Observatoire de la Côte d'Azur, à Nice, et membre des académies des sciences française et belge.

En dehors de quelques détails gênants, comme les masses trop petites de Mars et de Mercure par rapport aux résultats des simulations, ce scénario de « Jupiter en premier » semblait expliquer de façon satisfaisante la structure du Système solaire. Le mécanisme semblait assez universel pour qu'on s'attende à retrouver des organisations similaires autour d'autres étoiles : des planètes géantes sur des orbites de longue période au-delà de la ligne de glace, et des planètes rocheuses en deçà, avec des périodes orbitales de l'ordre de quelques années ou moins. Or les observations ont contredit ces pronostics.

La révolution des exoplanètes

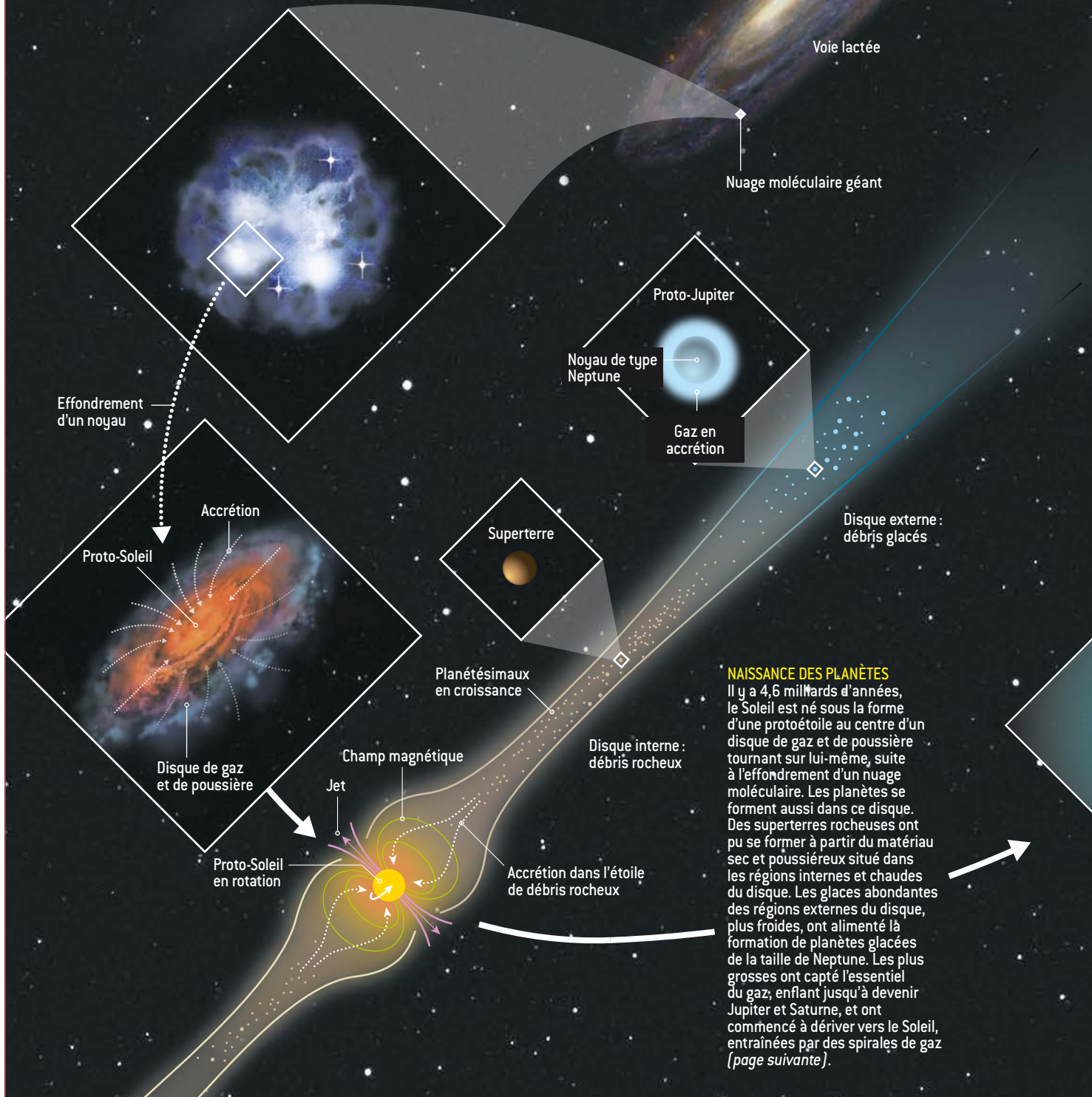
Quand les astronomes ont commencé à découvrir des exoplanètes, il y a plus de vingt ans, ils ont pu mettre à l'épreuve ce qu'ils savaient de la formation du Système solaire. Beaucoup des premières exoplanètes connues étaient des « jupiters chauds », des planètes gazeuses géantes tournant à toute allure près de leur étoile, avec des périodes de révolution de quelques jours seulement. L'existence de planètes géantes si proches de leur étoile, où la chaleur est si forte que la glace est totalement absente, est en contradiction avec le scénario classique de formation planétaire. Pour expliquer ce désaccord, les théoriciens ont conclu que ces planètes s'étaient formées plus à l'extérieur du disque, avant de migrer vers ses régions internes.

Il reste cependant que, avec les milliers d'exoplanètes trouvées par des relevés tels que la mission *Kepler* de la Nasa, le Système solaire apparaît comme une exception dans l'Univers. Le système planétaire moyen contient une ou plusieurs super-terres (des planètes environ deux à dix fois plus grandes que la Terre) avec des périodes orbitales inférieures à une centaine de jours. En revanche, on ne trouve de planètes géantes (des analogues de Jupiter et Saturne) que dans 10 % environ des systèmes extrasolaires, et, parmi elles, celles décrivant des orbites presque circulaires sont encore plus rares.

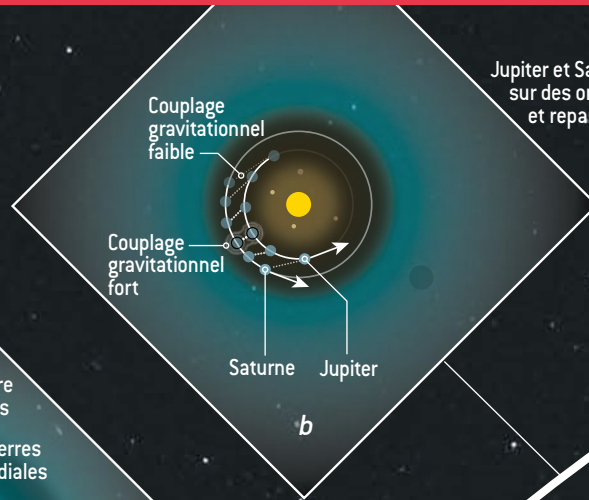
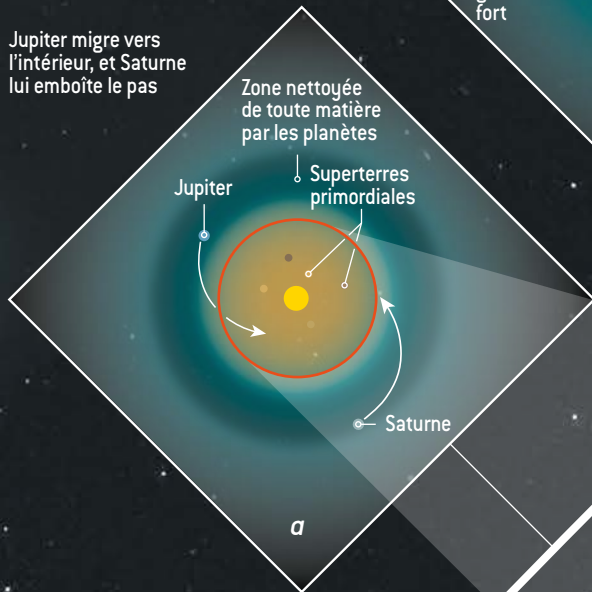
Leurs attentes ayant été déçues, les planétologues ont compris que les « quelques détails gênants » de la théorie classique de formation du Système solaire exigeaient de meilleures explications. Pourquoi la région interne du Système solaire est-elle si pauvre

L'ÉVOLUTION DU SYSTÈME SOLAIRE

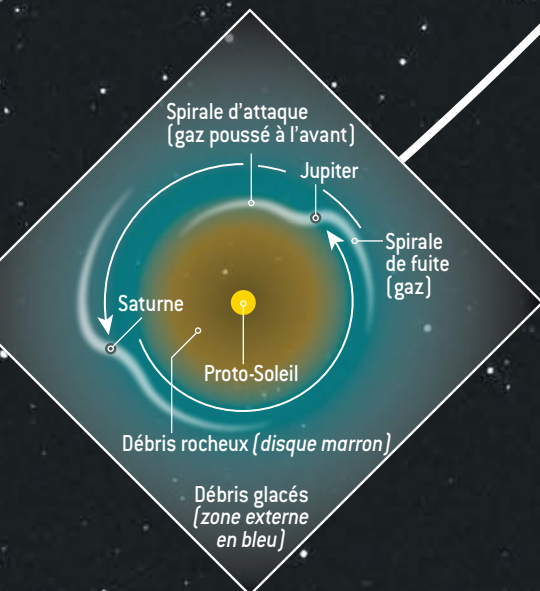
Les planétologues pensaient que le Système solaire, avec ses planètes rocheuses internes et ses géantes gazeuses externes, était d'un type banal. Or cette organisation est, en fait, plutôt une anomalie. Les « superterres », d'une masse comprise entre celle de la Terre et de Neptune, sont les planètes les plus courantes dans la Galaxie, mais il n'en existe aucune autour du Soleil. Et la plupart des étoiles sont dotées de planètes bien plus rapprochées que Mercure ne l'est du Soleil. Des interactions planétaires complexes lors de la jeunesse du Système solaire expliqueraient la structure de ce dernier.



Jupiter migre vers l'intérieur, et Saturne lui emboîte le pas



Jupiter et Saturne se stabilisent sur des orbites en résonance, et repartent vers l'extérieur

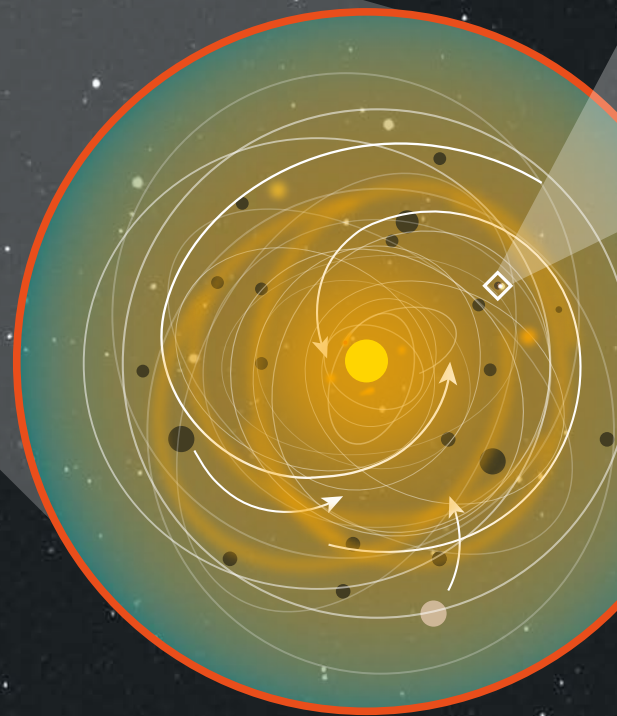


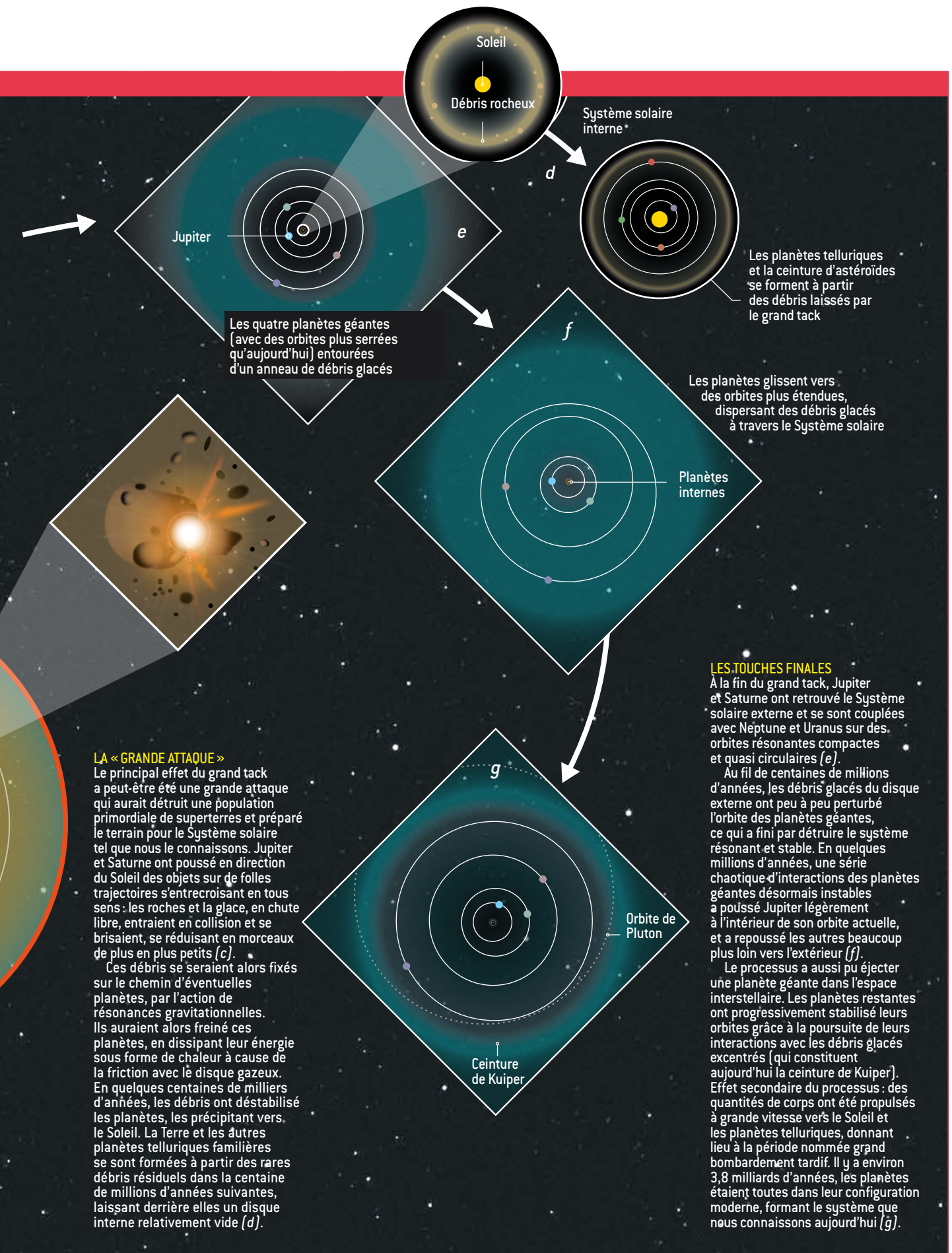
LE « GRAND TACK »

Pendant une centaine de milliers d'années, Jupiter a dérivé vers l'intérieur, avec Saturne dans son sillage, en faisant office de chasse-neige gravitationnel, poussant vers le Système solaire interne l'équivalent de plusieurs masses terrestres de matériau glacé. L'influence gravitationnelle entre les deux planètes a aussi creusé une grande lacune dans le disque (a).

En dérivant vers l'intérieur, Jupiter et Saturne se sont mis en résonance orbitale, Jupiter décrivant trois orbites autour du Soleil dans le temps que mettait Saturne pour accomplir deux révolutions. La résonance orbitale stabilise le couple de planètes et freine brutalement leur migration vers l'intérieur et les renvoie comme un boomerang vers la partie externe du Système solaire en un demi-million d'années environ, éparpillant en chemin des débris (b).

La redistribution du matériau au sein du disque par ce « grand tack » vers l'intérieur puis l'extérieur explique parfaitement la petite taille de Mars et la composition de l'actuelle ceinture d'astéroïdes.





LA « GRANDE ATTAQUE »

Le principal effet du grand tack a peut-être été une grande attaque qui aurait détruit une population primordiale de superterres et préparé le terrain pour le Système solaire tel que nous le connaissons. Jupiter et Saturne ont poussé en direction du Soleil des objets sur de folles trajectoires s'entrecroisant en tous sens : les roches et la glace, en chute libre, entraînent en collision et se brisaient, se réduisant en morceaux de plus en plus petits [c].

Ces débris se seraient alors fixés sur le chemin d'éventuelles planètes, par l'action de résonances gravitationnelles. Ils auraient alors freiné ces planètes, en dissipant leur énergie sous forme de chaleur à cause de la friction avec le disque gazeux. En quelques centaines de milliers d'années, les débris ont déstabilisé les planètes, les précipitant vers le Soleil. La Terre et les autres planètes telluriques familières se sont formées à partir des rares débris résiduels dans la centaine de millions d'années suivantes, laissant derrière elles un disque interne relativement vide [d].

LES TOUCHES FINALES

À la fin du grand tack, Jupiter et Saturne ont retrouvé le Système solaire externe et se sont couplées avec Neptune et Uranus sur des orbites résonantes compactes et quasi circulaires [e].

Au fil de centaines de millions d'années, les débris glacés du disque externe ont peu à peu perturbé l'orbite des planètes géantes, ce qui a fini par détruire le système résonant et stable. En quelques millions d'années, une série chaotique d'interactions des planètes géantes désormais instables a poussé Jupiter légèrement à l'intérieur de son orbite actuelle, et a repoussé les autres beaucoup plus loin vers l'extérieur [f].

Le processus a aussi pu éjecter une planète géante dans l'espace interstellaire. Les planètes restantes ont progressivement stabilisé leurs orbites grâce à la poursuite de leurs interactions avec les débris glacés excentrés (qui constituent aujourd'hui la ceinture de Kuiper). Effet secondaire du processus : des quantités de corps ont été propulsés à grande vitesse vers le Soleil et les planètes telluriques, donnant lieu à la période nommée grand bombardement tardif. Il y a environ 3,8 milliards d'années, les planètes étaient toutes dans leur configuration moderne, formant le système que nous connaissons aujourd'hui [g].

Différents phénomènes gravitationnels ont conduit les planètes à entreprendre d'épiques traversées du disque protoplanétaire

en masse, comparée à ses homologues exoplanétaires, avec des planètes rocheuses maigrichonnes au lieu de superterres et sans aucune planète plus proche du Soleil que Mercure ? Et pourquoi les orbites des planètes géantes du Soleil sont-elles si paisibles et éloignées ?

Les différents indices révélés par l'étude des exoplanètes nous ont fait comprendre que l'orbite des planètes pouvait changer drastiquement au cours du temps. Ainsi, une planète en formation pourrait dériver loin de son point d'origine, un peu comme un radeau de survie sur l'océan.

Les astronomes ont d'abord cherché quel serait le mécanisme de migration. Dès qu'une planète est devenue assez grosse, son influence gravitationnelle s'étend au disque environnant, et engendre des ondes de densité spirales. Celles-ci exercent, à leur tour, des forces gravitationnelles. Cette dynamique crée d'importantes rétroactions entre les planètes et le disque : en interagissant avec ces ondes, les jeunes grosses planètes sont freinées sur leur orbite, ce qui les conduit à se rapprocher de leur étoile.

Quand ce processus de migration planétaire est intégré au modèle, la ligne de glace au sein des disques ne joue plus un rôle prépondérant dans le façonnage et l'architecture des systèmes planétaires. Par exemple, des planètes géantes nées au-delà de la ligne de glace peuvent devenir des jupiters chauds en dérivant vers l'intérieur. Le problème est que ce processus fonctionne presque trop bien : il semble avoir eu lieu dans de très nombreux disques protoplanétaires. Comment, dans ces conditions, expliquer les orbites décrites par Jupiter et Saturne, si éloignées du Soleil ?

En 2001, à l'université Queen Mary de Londres, Frédéric Masset et Mark Snellgrove ont donné la première ébauche d'une explication convaincante. Les deux chercheurs ont modélisé l'évolution simultanée des orbites de Saturne et de Jupiter dans le disque protoplanétaire du Soleil. En raison de la masse inférieure de Saturne, le rythme de migration de cette planète vers l'intérieur est plus rapide que celui de Jupiter, et à

mesure que leur migration progresse, les deux planètes se rapprochent. Finalement, les orbites atteignent une configuration particulière, nommée résonance orbitale, dans laquelle Jupiter effectue trois révolutions autour du Soleil quand Saturne en fait deux dans le même temps.

Deux planètes liées par une résonance orbitale échangent de l'énergie mécanique, ce qui stabilise leurs orbites. L'influence gravitationnelle commune des deux planètes est amplifiée et s'exerce essentiellement l'une sur l'autre et sur leur environnement. Dans le cas de Jupiter et de Saturne, l'influence des deux corps a creusé une grande lacune – c'est-à-dire une région vide de matière – dans le disque protoplanétaire, Jupiter étant sur le bord interne de la lacune et Saturne sur son bord externe. La formation de la lacune conduit à un déséquilibre des rétroactions du disque sur ces deux planètes. Et comme Jupiter exerce une attraction gravitationnelle plus importante sur le disque interne que ne le fait Saturne sur le disque externe, les planétologues ont montré que les deux planètes ont rebroussé chemin et ont commencé à s'éloigner du Soleil. Ce mouvement vers l'intérieur puis vers l'extérieur est souvent nommé le grand tack (ou grand virement de bord), par analogie avec la trajectoire d'un voilier qui tire des bords pour remonter au vent.

Jupiter, le régime minceur de Mars

En 2011, une décennie après l'introduction du concept de grand tack, Kevin Walsh, alors à l'observatoire de la Côte-d'Azur, à Nice, et ses collègues ont montré grâce à des simulations numériques que ce modèle explique non seulement l'histoire dynamique de Jupiter et de Saturne, mais aussi la composition de la ceinture principale d'astéroïdes (qui contient des planétésimaux rocheux et glacés) ainsi que la faible masse de Mars.

Comment ? Quand Jupiter a migré vers l'intérieur, la planète s'est comportée comme un chasse-neige. Par son influence gravitationnelle, elle a capturé et poussé des planétésimaux devant elle sur sa trajectoire. On suppose que dans sa migration, Jupiter s'est approchée du Soleil jusqu'à l'orbite actuelle de Mars (1,5 fois la distance Soleil-Terre actuelle) avant de faire demi-tour. Elle aurait alors pu repousser l'équivalent de plusieurs masses terrestres de matériau

La « planète Neuf » dont l'existence a été récemment avancée est-elle en accord avec les dernières théories de l'origine du Système solaire ? Seule son observation et la détermination de ses propriétés permettront de le dire.

L'idée selon laquelle le Système solaire aurait subi de violents remaniements dans un passé lointain pourrait expliquer beaucoup de choses : l'existence des corps glacés de la ceinture de Kuiper et du nuage d'Oort qui nous entourent, le bombardement ancien des planètes internes par des astéroïdes il y a des milliards d'années et l'absence de superterres que les autres systèmes possèdent en abondance. Mais, désormais, les planétologues doivent compter avec un nouvel élément : une planète putative, environ dix fois plus massive que la Terre, en orbite dans les régions sombres au-delà de Pluton. Si cette planète existe, son influence gravitationnelle expliquerait pourquoi une poignée d'objets de la ceinture de Kuiper parmi les plus lointains décrivent des trajectoires étonnamment resserrées et similaires.

Mais cela pourrait aussi être un indice supplémentaire pour expliquer les changements dramatiques subis par le Système solaire dans sa jeunesse. Avec une distance minimale au Soleil de 30,5 milliards de kilomètres (cinq fois plus loin que la distance moyenne de Pluton), il est peu probable que cette planète massive ait pu se former là où elle se trouve actuellement : il n'y aurait tout simplement pas eu assez de matière pour la constituer. « Si elle existe », dit Harold Levison, théoricien de la formation planétaire au SwRI (Southwest Research Institute), « elle s'est très probablement formée dans une région comprise entre 5 et 20 fois la distance Terre-Soleil et a été expulsée par [des

interactions gravitationnelles avec] Jupiter ou Saturne. »

En effet, Jupiter, en particulier, est si massive, selon Scott Tremaine, de l'Institut d'études avancées de Princeton, qu'« elle ne se soucie pas de savoir si elle éjecte une comète ou une planète de dix masses terrestres ».

Mais une fois éjectée, une planète aurait tendance à poursuivre sa route et à finalement s'échapper dans l'espace interstellaire. La probabilité qu'elle se mette en orbite autour du Soleil est très faible. Statistiquement, explique Harold Levison, il faudrait en avoir 50 ou 100 au départ pour en avoir une à l'arrivée, ce qu'il considère comme improbable.

Si les astronomes parviennent effectivement à détecter la neuvième planète avec leurs télescopes, la question de la probabilité cessera évidemment de se poser. En revanche, les théoriciens devront alors déterminer comment quelque chose d'aussi peu probable a pu se produire. « J'ai dans l'idée », dit Scott Tremaine, « que le processus de dispersion est plus efficace que le modèle standard ne donne à penser. » Autrement dit, un pourcentage plus élevé qu'attendu d'objets expédiés vers l'extérieur parviendrait à rester dans le Système solaire.

D'après Ben Bromley, de l'université de l'Utah, cela pourrait s'expliquer si la dispersion d'une superterre s'est produite très tôt dans l'histoire du Système solaire, avant la dissipation du gaz du disque protoplanétaire qui a formé les planètes. Si la dispersion d'une

superterre s'est produite durant cette période, note Ben Bromley, « la planète aurait interagi avec le gaz et se serait installée à l'écart de tout ».

Ou peut-être, avance Nathan Kaib, théoricien à l'université de l'Oklahoma, la planète, si elle existe, ne provient-elle pas de notre Système solaire. Le Soleil s'est formé non pas dans l'isolement total, mais dans un amas contenant probablement des milliers d'étoiles, chacune (vraisemblablement) avec son propre système planétaire. Certains de ces systèmes auraient subi leurs propres remaniements violents, éjectant des objets de la même façon que le Soleil l'a sans doute fait.

Ces objets, explique Nathan Kaib, peuvent être capturés par notre propre Soleil.

La meilleure explication dépendra des caractéristiques de l'orbite de la neuvième planète ; ses partisans n'ont calculé qu'une plage de possibilités. Si la planète existe, les scientifiques devraient être capables de calculer comment elle est arrivée à sa place actuelle.

La neuvième planète est-elle en accord avec ce que nous savons actuellement des débuts du Système solaire ? La réponse de Scott Tremaine entretient le suspens : « Peut-être. »

– Michael Lemonick
Scientific American



© Ron Miller

de construction planétaire glacé vers la région occupée aujourd'hui par la Terre, l'ensemencant en eau et autres éléments volatils. Ce processus aurait alors privé l'embryon planétaire voisin, la future Mars, de matériau pour poursuivre sa croissance.

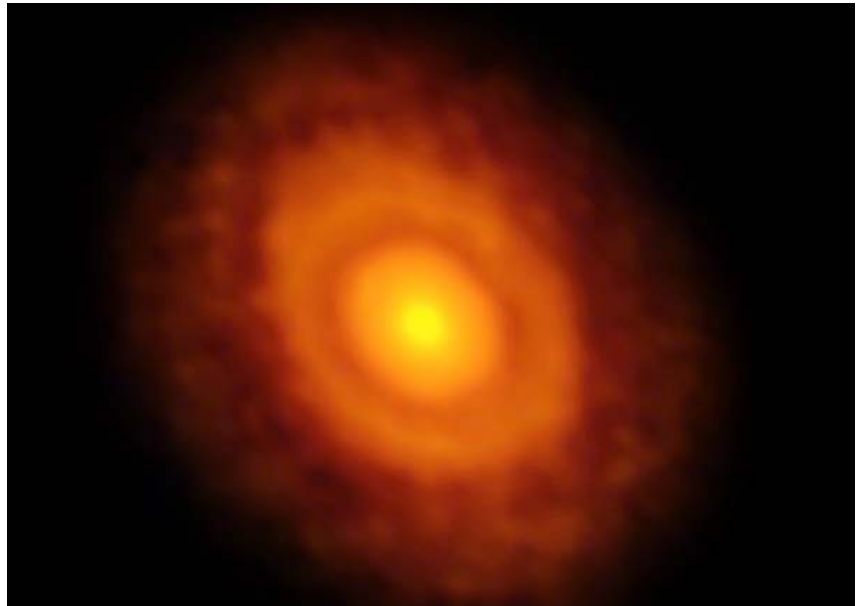
Par ailleurs, des planétésimaux se sont accumulés dans la ceinture principale d'astéroïdes du fait de résonances gravitationnelles avec Jupiter. D'après le modèle, les corps rocheux étaient déjà présents dans cette région tandis que les astéroïdes riches en glace se sont formés au-delà de l'orbite actuelle de Jupiter et se sont implantés dans la ceinture lors de la migration de la planète gazeuse vers l'extérieur.

Le scénario du grand tack semble convaincant. Pourtant, nous ne parvenons pas à faire le lien avec l'autre grand mystère restant du Système solaire, à savoir l'absence totale de planètes en deçà de l'orbite de Mercure. Au regard des autres systèmes, qui ont des superterres sur des orbites serrées, le nôtre donnerait presque l'impression d'avoir été évidé. Pourquoi ? Il semble étrange que le Système solaire n'ait pas connu le mode de formation planétaire le plus couramment observé ailleurs dans le cosmos.

En 2015, deux d'entre nous (Konstantin Batygin et Gregory Laughlin) ont étudié quelles seraient les conséquences du grand tack sur un hypothétique cortège de superterres en orbite tout près du Soleil. Notre conclusion est qu'elles n'auraient pas survécu.

En effet, avec son effet chasse-neige alors qu'elle dérivait vers la partie interne du Système solaire, Jupiter aurait perturbé les orbites circulaires et ordonnées des planétésimaux rencontrés en chemin. Elle les aurait expédiés, telle une nuée désordonnée, sur des trajectoires entrecroisées. Certains des planétésimaux seraient entrés violemment en collision et auraient ainsi produit de nombreux débris, entraînant une cascade de nouvelles collisions et fragmentations. La migration de Jupiter vers l'intérieur a vraisemblablement érodé la population de planétésimaux, les réduisant essentiellement à l'état de rochers, cailloux et sable.

Sous l'effet du broyage collisionnel et des frottements avec le gaz du disque protoplanétaire interne, les planétésimaux qui s'érodaient et se fragmentaient ont freiné et se sont donc rapprochés en spirale du Soleil. En tombant, ils auraient été facilement capturés dans des résonances gravitationnelles, s'accumulant dangereusement près



© ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/L. Cieza

LE DISQUE PROTOPLANÉTAIRE de l'étoile V883 Orionis, observé par le radiotélescope ALMA, met en évidence, pour la première fois, la ligne de glace [l'anneau sombre le plus proche du centre] qui sépare la région interne, pauvre en eau, de celle à l'extérieur, où les conditions de température et de pression permettent la formation de glace d'eau.

des trajectoires d'éventuelles superterres primordiales en orbite proche du Soleil.

Cela aurait été une mauvaise nouvelle pour ces planètes, qui auraient été brutalement assaillies par des essaims parasites de débris et auraient perdu progressivement de l'énergie. L'effet net est que les planètes auraient ralenti et changé d'orbite pour amorcer des spirales de chute dans le Soleil. Nos simulations suggèrent qu'aucune de ces planètes hypothétiques n'aurait survécu plus de quelques centaines de milliers d'années après le début de la cascade de collisions.

Une « grande attaque » de Jupiter

Ainsi, il est possible que le grand tack de Jupiter et Saturne ait lancé une véritable « grande attaque » sur une population de planètes primordiales proches du Soleil. Et en disparaissant dans l'étoile, ces anciennes superterres auraient laissé derrière elles une région vide dans la nébuleuse solaire, dans la zone qui s'étend à peu près jusqu'à l'orbite actuelle de Mercure. Par conséquent, l'incursion de Jupiter dans le Système solaire primordial aurait produit un anneau relativement étroit de débris rocheux, à partir duquel les quatre planètes telluriques se sont formées quelques centaines de millions d'années plus tard. L'enchaînement des événements aléatoires nécessaire pour produire une chorégraphie aussi subtile suggère que les petites planètes rocheuses de type tellurique (et peut-être la vie elle-même) seraient assez rares dans le cosmos.

■ BIBLIOGRAPHIE

K. Batygin et M. Brown, **Evidence for a distant giant planet in the solar system**, *Astronomical Journal*, vol. 151, n° 2, 2016.

M. Lemonick, **La longue traque de la planète X**, *Pour la Science*, n° 461, mars 2016.

K. Batygin et G. Laughlin, **Jupiter's decisive role in the inner Solar System's early evolution**, *PNAS*, vol. 112 [14], pp. 4214-4217, 2015.

A. Morbidelli, **Dynamical evolution of planetary systems**, dans T. D. Oswalt *et al.* (éd.), *Planets, Stars and Stellar Systems*, vol. 3, pp. 63-109, Springer, 2013.

K. J. Walsh *et al.*, **A low mass for Mars from Jupiter's early gas-driven migration**, *Nature*, vol. 475, pp. 206-209, 2011.

Quand Jupiter et Saturne ont fini par se frayer le chemin du retour après leur incursion dans le système interne, le disque environnant de gaz et de poussière était sur le déclin. La paire résonante Jupiter-Saturne a fini par rencontrer Uranus et Neptune récemment formées, ainsi peut-être qu'un autre corps de taille similaire. Les interactions avec le gaz aidant, le duo dynamique a enrôlé ces géantes plus modestes dans des résonances orbitales.

Ainsi, juste au moment où l'essentiel du gaz du disque disparaissait, la région interne du Système solaire ne comportait probablement qu'un anneau de débris rocheux au voisinage de l'orbite actuelle de la Terre.

Dans la région externe, un groupe compact et résonant d'au moins quatre planètes géantes occupait des orbites presque circulaires, la plus proche se situant à peu près au niveau de l'orbite actuelle de Jupiter et la plus lointaine environ à mi-chemin de l'actuelle orbite de Neptune. Au-delà de l'orbite la plus externe, les planétésimaux glacés du disque externe s'étendaient jusqu'aux confins du Système solaire.

Puis, en plusieurs centaines de millions d'années, les planètes telluriques se sont formées, et les planètes externes jadis agitées se sont assagies, trouvant une stabilité que l'on aurait pu croire définitive. Mais le hasard en a voulu autrement : ce n'était pas encore la phase finale de l'évolution du Système solaire.

Le grand tack et la grande attaque contemporaine ont préparé le terrain à un dernier sursaut de violence interplanétaire dans l'histoire ancienne du Système solaire, une touche finale qui place le cortège planétaire dans une configuration très proche de celle d'aujourd'hui, des milliards d'années plus tard. Ce dernier sursaut est connu sous le nom de grand bombardement tardif. Durant cette période (il y a entre 4,1 et 3,8 milliards d'années), le Système solaire s'est momentanément transformé en stand de tir, théâtre d'un mitraillage permanent par des planétésimaux. Nous en voyons encore aujourd'hui les cicatrices avec les énormes cratères qui criblent la surface de la Lune.

En collaboration avec plusieurs collègues de l'observatoire de la Côte d'Azur à Nice, en 2005, l'un d'entre nous (Alessandro Morbidelli) a conçu le modèle dit de Nice pour expliquer comment les interactions des planètes géantes ont pu produire le grand bombardement tardif. Là où le grand tack prend fin, le modèle de Nice prend la relève.

À la fin du grand tack, les planètes géantes étaient en résonance les unes avec les autres sur des orbites proches et ressentaient aussi les tiraillements gravitationnels des planétésimaux glacés au-delà de leurs orbites. Malgré les résonances, elles étaient en fait en équilibre précaire, au bord de l'instabilité. En cumulant leurs effets sur des millions d'orbites et des centaines de millions d'années, les tiraillements insignifiants des planétésimaux externes ont peu à peu décalé le mouvement des géantes, grignotant lentement le délicat équilibre des résonances qui les liaient. Le point de

Le grand tack de Jupiter et Saturne aurait déclenché la grande attaque, à laquelle d'éventuelles superterres n'auraient pas survécu

basculer correspond au moment où l'une des géantes est sortie de la configuration de résonance avec une autre, détricotant l'équilibre et déclenchant une série chaotique de perturbations qui a légèrement poussé Jupiter vers l'intérieur tout en éparpillant les autres plus à l'extérieur.

Dans un bref intervalle cosmique de quelques millions d'années, le Système solaire externe a ainsi subi une inconfortable transition, passant d'un état ramassé et quasi circulaire à une vaste configuration désordonnée, caractérisée par des planètes qui suivent d'immenses orbites de forte excentricité. Les interactions des planètes géantes étaient si violentes qu'une ou plusieurs d'entre elles ont pu être dispersées, éjectées vers l'espace interstellaire.

Si l'évolution dynamique s'était arrêtée là, l'architecture du Système solaire externe aurait bien reproduit les tendances observées avec les exoplanètes géantes, dont beaucoup décrivent des orbites excentriques autour de leur étoile. Mais le disque de planétésimaux glacés qui était à l'origine du désordre a aussi contribué à le supprimer par ses interactions ultérieures avec les orbites excentriques des planètes géantes. Un à un, la plupart des planétésimaux en orbite proche ont été éjectés par Jupiter et les autres planètes géantes, ce qui a progressivement ponctionné de l'énergie orbitale des planètes et rendu à nouveau circulaires leurs orbites. Une partie des planétésimaux

ont donné lieu au grand bombardement tardif, d'autres ont été éjectés au-delà de la portée gravitationnelle du Soleil et une petite fraction d'entre eux se sont maintenus sur des orbites liées, formant l'anneau de débris glacés situé aujourd'hui au-delà de l'orbite de Neptune, la ceinture de Kuiper.

Des travaux d'observation patients nous révèlent petit à petit la structure complète de la ceinture de Kuiper, et des caractéristiques inattendues se dévoilent peu à peu. En particulier, les astronomes ont repéré un motif particulier parmi les objets les plus lointains de la ceinture de Kuiper. Malgré des distances au Soleil variées, les orbites de ces objets sont regroupées dans une certaine région, comme s'ils étaient tous soumis à une même perturbation de grande ampleur.

Des simulations numériques effectuées par Konstantin Batygin et Michael Brown, de l'Institut de technologie de Californie, ont montré que cette situation se produit naturellement s'il existe une neuvième planète, une dizaine de fois plus massive que la Terre et évoluant sur une orbite très excentrique autour du Soleil, avec une période d'environ 20000 ans. Une telle planète a peu de chances de s'être formée si loin, mais on peut en rendre compte si l'on suppose qu'il s'agit d'une exilée, éjectée d'une orbite plus rapprochée dans l'enfance du Système solaire (voir l'encadré pages 25-27).

À la recherche de la neuvième planète

Si l'existence de cette planète autour du Soleil était confirmée, cela resserrerait fortement les contraintes de notre vision du Système solaire. En ce moment même, les astronomes se préparent à mettre à contribution certains des plus grands télescopes afin de rechercher activement cette hypothétique planète.

L'histoire du Système solaire qui s'esquisse ainsi, avec les restructurations parfois brutales du grand tack, de la grande attaque et du modèle de Nice, et l'existence soupçonnée d'une planète supplémentaire, promet de devenir l'une des plus belles réussites de la science moderne, et sans contester l'une des plus belles histoires qui puissent jamais être contées. ■



LES RAYURES NOIRES ornant la robe d'un tigre constituent une sorte de code-barres, qui permet d'identifier l'individu de façon certaine.

Mieux recenser les tigres pour les sauver

Ullas Karanth

Les techniques de suivi des populations de tigres ont connu de grands progrès au cours des dernières années. Encore faut-il que les organismes chargés de la protection du grand félin asiatique les appliquent.

Le grand félin *Panthera tigris* rôde dans le Malnad – le « Pays des pluies ». Quand j'étais écolier dans cette zone de collines boisées de l'État du Karnataka, au sud-ouest de l'Inde, le tigre me fascinait, mais je n'en avais jamais vu. Les nombreux rituels hindous figurant ce grand fauve alimentaient ma fascination. Au cours du grand festival d'automne, le Dasara, des danseurs interprétaient par exemple le *hulivesha*, la danse rituelle du tigre. Le corps peint de motifs ocre, blancs et noirs, ils imitaient au rythme des battements de tambours les gracieux mouvements du félin, célébrant ainsi une tradition propre au Karnataka. Pour autant, l'avenir du tigre était sombre : tandis qu'éleveurs de bétail et chasseurs tuaient les derniers tigres sauvages, les bûcherons abattaient sans relâche les arbres des forêts afin d'en tirer du bois de construction. À tel point qu'une fois adolescent, dans les années 1960, j'ai abandonné tout espoir de voir un jour de mes propres yeux un tigre sauvage.

Quelques années plus tard, cependant, un événement inattendu se produisit : en réponse aux pressions grandissantes des partisans de la protection de l'environnement, Indira Gandhi, notre Première ministre de l'époque, fit voter des lois strictes. Plusieurs réserves naturelles furent établies. Dans

L'ESSENTIEL

- **Aujourd'hui, l'aire de répartition des tigres ne représente plus que 7 % de sa surface historique.**
- **La survie du tigre, *Panthera tigris*, repose sur une cinquantaine de populations concentrées, qu'il faut suivre en permanence et protéger.**
- **Toutefois, de nombreux organismes de protection comptent leurs tigres par des méthodes désuètes, qui ne produisent pas de résultats dignes de confiance.**
- **L'exploitation statistique et systématique des images enregistrées par des pièges photographiques fournit des estimations plus fiables, à même d'orienter les actions.**

les décennies qui suivirent, la protection du tigre prit de l'ampleur. De nombreux pays en interdirent la chasse. Ils tentèrent de concilier le besoin qu'ont les tigres de disposer de vastes espaces forestiers et la pression humaine sur cet habitat. L'Inde a fait mieux que la plupart des autres nations concernées : bien que son territoire n'englobe que 20 % de l'habitat résiduel de *P. tigris*, 70 % des tigres du monde y vivent. Étant donné les pressions exercées dans ce pays par ses 1,2 milliard d'habitants, la pauvreté persistante et le développement de l'activité industrielle, ce n'est pas un mince exploit.

L'habitat des tigres s'est réduit de 93 %

En dépit de tous ces efforts, les populations de tigres n'ont cessé de décliner à travers l'Asie. Il y a seulement deux siècles, la zone habitée par les tigres sauvages s'étendait des roselières de la mer Caspienne aux forêts tropicales humides d'Indonésie, en passant par la taïga sibérienne. Aujourd'hui, cet immense espace a perdu 93 % de sa surface. Seules quelques populations isolées persistent au sein d'une poignée de pays. Et les seules qui ont des chances raisonnables de redressement n'occupent que 0,5 % de l'aire de répartition initiale du tigre.

Les 40 à 50 populations correspondantes sont nommées « populations sources », car ce sont les seules qui soient assez grandes pour assurer la reproduction de *P. tigris*. Or même pour elles l'avenir n'est pas assuré, tant elles sont isolées et entourées de territoires hostiles peuplés d'humains. Comme des patients en soins intensifs, les populations sources de tigres doivent être étroitement suivies. Pourtant, malgré les efforts de protection consentis depuis longtemps, le suivi de ces populations est plutôt l'exception que la règle. C'est pourquoi les chercheurs savent encore mal comment les tigres vivent et survivent. Les méthodes traditionnelles de surveillance des populations suffisent au mieux à prouver en quels endroits d'Asie survit *P. tigris*, mais elles ne produisent pas d'estimations fiables des effectifs tigres restants. Les effectifs brandis par les protecteurs de l'environnement dans les médias s'appuient en réalité sur peu d'indices.

Il est extrêmement difficile de déterminer combien de tigres vivent et où, car ces grands félins sont fort discrets, très mobiles et habitent d'immenses territoires. Ces caractéristiques ont rendu vaines toutes les campagnes de recensement à partir de traces de pas, effectuées en Inde, au Népal, au Bangladesh et en Russie depuis les années 1960. On supposait que, de même que les empreintes digitales humaines sont uniques, les empreintes de pattes de tigre l'étaient aussi. Mais ces traces sont difficiles à trouver et à distinguer. En Inde, les jeux de données peu fiables engendrés par cette méthode ont fait croire à l'augmentation du nombre des tigres, alors même que les risques pesant sur *P. tigris* se multipliaient.



© DR

■ L'AUTEUR



K. Ullas KARANTH, biologiste de la conservation, étudie les tigres depuis plus de trente ans.

Il travaille dans l'organisation non gouvernementale Wildlife Conservation Society, dont le siège est à New York.

LE MALNAD, OU MALENADU, est une région montagneuse couvrant les pentes occidentales et orientales de la chaîne des Ghats occidentaux, dans l'État indien du Karnataka. Le Malnad inclut le sanctuaire de faune sauvage du Bhadra et six parcs naturels accueillant des tigres, dont celui de Nagarahole mentionné par l'auteur.



© Raghur Nair

Heureusement, pendant que les autorités de protection comptaient les pattes – leurs traces du moins –, les progrès de la photographie, de la statistique et de l'informatique appliquées à l'écologie donnaient naissance à de nouvelles méthodes de comptage, enfin précises et fiables.

Les tigres du parc de Nagarahole à l'étude

Dans les années 1980, au cours de la préparation de ma thèse de doctorat à l'université de Floride, j'ai étudié ces nouvelles approches. J'espérais pénétrer grâce à elles le monde si secret des tigres et mieux saisir leur comportement. Le cas de la population de tigres du parc national de Nagarahole, qui a connu un renouveau après la création de cette réserve dans le Malnad à l'époque d'Indira Gandhi, me motivait particulièrement. En 1990, je saisis ma chance, en rejoignant la Société pour la conservation de la faune sauvage (la Wildlife Conservation Society), afin de réaliser la première étude radiotéléométrique des tigres indiens. L'idée était que la surveillance rapprochée de quelques individus pourrait nous en dire plus sur le comportement de ces grands fauves.

Je me souviendrai toujours de ce matin frais et clair du 29 janvier 1990. Perché à 5 mètres du sol dans un arbre, un fusil à fléchettes chargées de sédatif en mains, j'attendais l'arrivée d'un tigre de 220 kilogrammes. Les membres de mon équipe étaient en train de le rabattre vers l'extrémité d'un large entonnoir en tissu tendu dans la forêt. Soudain, à 50 mètres, je repérai une lueur dorée : calmement, le tigre s'avancait vers moi. Quand ses épaules puis ses flancs apparurent dans la mire de mon fusil, j'appuyai doucement sur la détente. Lorsque la fléchette empennée de rouge alla se fichir dans sa cuisse, il laissa échapper un léger grognement.

Nous le découvriâmes ensuite endormi à l'ombre d'un arbre. Là nous pûmes lui accrocher un collier équipé d'un émetteur de la taille d'un poing. Captés à l'aide d'une antenne portable, ses signaux radio allaient permettre de localiser ce tigre à tout instant. Quelques heures plus tard, T-04, le nom donné à cet individu, se relevait et s'ajoutait aux trois tigres déjà équipés dans cette réserve de 645 kilomètres carrés.

Au cours des six années suivantes, ce suivi télémétrique m'a permis de passer



L'AUTEUR INSTALLE UN PIÈGE PHOTOGRAPHIQUE dans une forêt [à gauche], qui prendra automatiquement des images des animaux défilant devant lui. Les tigres réagissent diversement au flash de cet

appareil : certains deviennent curieux et s'approchent volontiers des pièges [à droite] ; d'autres, au contraire, deviennent méfiants et les évitent, ce qui n'est pas sans incidence sur les statistiques.

bien moins de temps à traquer des tigres à l'aveuglette et bien plus à les observer. Pour la première fois, nous avons mesuré à quel point ces fauves sont mobiles. Les femelles résidentes que je pistais à Nagarhole occupaient un territoire d'environ 18 kilomètres carrés, les mâles d'environ 50. Les tigres sont des animaux territoriaux, ils s'évitent les uns les autres, sauf lors de la reproduction. Ces superficies relativement réduites suggéraient une densité de tigres plus élevée que celles estimées jusqu'alors dans les réserves.

La télémétrie nous a aussi révélé ce que les tigres du Malnad mangeaient, car elle m'a permis de retrouver leurs proies. Ces observations et les collections de fèces, encore plus puantes que les restes d'animaux prédatés, nous ont appris que les tigres tuent à peu près une grande proie par semaine, dont ils consomment les deux tiers en trois à quatre jours, avant de reprendre leur errance. Ces nouvelles connaissances sur le régime alimentaire du grand félin impliquaient que la réduction du nombre des proies due aux chasseurs était un facteur décisif dans le déclin des populations de tigres. Cela donnait déjà une première orientation pour agir en faveur de *P. tigris*.

En 1993, j'ai conçu un moyen d'estimer le nombre de grosses proies d'un tigre, c'est-à-dire le nombre de cerfs, de sangliers et de bovidés sauvages présents dans une zone donnée. J'ai adopté la méthode d'échantillonnage mise au point par les biologistes animaliers américains : deux chercheurs progressent discrètement à travers la forêt le long d'étroites pistes rectilignes de 3,2 kilomètres de long et comptent les proies qu'ils aperçoivent. À l'aide d'un télémètre, ils mesurent en outre à quelle distance de la piste chaque animal se trouve. Même si beaucoup d'individus passent inaperçus, le comptage et la télémétrie permettent d'évaluer le nombre de proies potentielles sur le terrain.

Des proies abondantes

Mes résultats furent les premiers de ce type en Asie. En les étudiant, j'ai été frappé par l'abondance de proies que présentent les forêts protégées du Malnad : de 16 à 68 onguilés sauvages – cerfs, sangliers et bovins – par kilomètre carré, soit une densité supérieure à celles des riches savanes d'Afrique de l'Est. Une bonne nouvelle pour les tigres ! Ainsi, quoique relativement petites comparées aux parcs nationaux d'Amérique du Nord ou

d'Afrique, les réserves naturelles de l'Inde peuvent subvenir aux besoins d'un grand nombre de tigres. Grâce à ces évaluations des effectifs des proies, les biologistes ont commencé à estimer combien de tigres chaque forêt d'Asie peut nourrir.

Toutefois, au milieu des années 1990, les tigres des réserves indiennes ont subi un braconnage intensif pratiqué par des bandes criminelles, à la suite de l'augmentation de la demande de parties de tigres (peaux, os, certains organes...) due à la multiplication des nouveaux riches chinois. Dès lors, les protecteurs de l'environnement avaient besoin d'évaluer l'impact de ce braconnage sur les populations sources en effectuant des décomptes précis. Combien de tigres restait-il ? Combien en perdait-on ou en gagnait-on chaque année ? Leur nombre fluctuait-il naturellement ? Leur densité variait-elle d'une région à l'autre ?

Pour répondre à ces questions, j'ai entrepris d'identifier et de compter les tigres d'une façon nouvelle pour l'époque : en exploitant systématiquement les clichés pris par des pièges photographiques placés le long des pistes. Tout animal passant devant un tel piège déclenche ce dernier ; on pouvait alors identifier sans erreur chaque tigre en examinant le « code-barres »

naturel que constituent les rayures noires de sa robe. Les pièges photographiques ont permis d'identifier beaucoup plus de tigres qu'avec la radiotélémétrie. Pour autant, je m'aperçus que les pièges ne photographiaient qu'une partie des tigres. C'est pourquoi, afin de compenser cette limite de détection, il me fallut trouver le moyen d'extrapoler correctement la taille de la population totale à partir du nombre d'animaux photographiés.

Quelle était la bonne approche statistique pour ce faire ? Cette question me conduisit à Jim Nichols, du centre de recherche sur la faune sauvage Patuxent, une émanation de l'USGS – l'Institut d'études géologiques des États-Unis. Jim Nichols est un expert des modèles de capture-marquage-recapture. Ces derniers infèrent l'effectif total d'une population à partir du nombre d'individus marqués que l'on recapture lors de sondages ultérieurs. Comment ?

Imaginez une urne contenant des billes de taille identique. Vous en extrayez quelques-unes, vous les étiquetez et les remettez dans le récipient. Après avoir mélangé, vous reprenez une poignée de billes : certaines sont étiquetées, les autres non. À partir de la fréquence de « recapture » des billes étiquetées, on déduit à l'aide des modèles statistiques le nombre total de billes que contient l'urne.

Il me fallait adapter cette méthode à une population de tigres en tenant compte des spécificités de la biologie du fauve et des contraintes de terrain qu'impose son habitat. En effet, alors que chaque bille a la même probabilité d'être tirée de l'urne, il n'en est pas de même pour un tigre d'une population sauvage. En raison de l'implantation de leur territoire et des trajets préférés qu'ils y adoptent, certains individus ont bien plus de chances d'être « tirés », c'est-à-dire photographiés. Chaque individu n'a donc pas la même probabilité d'être pris dans un piège photographique. Les déplacements des tigres peuvent en outre varier en fonction de la saison, de l'âge et du sexe de l'individu, ce qui joue aussi sur les taux de capture. Par ailleurs, certains tigres sont effrayés par le flash de l'appareil photo et évitent ensuite soigneusement de repasser devant le piège, tandis que d'autres

y sont indifférents. Enfin, contrairement aux billes, les tigres se reproduisent, meurent ou émigrent. Afin de réduire l'influence de tous ces biais et d'éviter que les données recueillies ne varient trop, j'ai décidé d'échantillonner la population à plusieurs reprises, mais pendant de courtes périodes, de 30 à 45 jours. Hélas, de nombreuses et onéreuses campagnes de recensement des tigres ne prennent pas cette précaution et aboutissent ainsi à des effectifs surestimés.

Jusqu'à 15 tigres pour 100 kilomètres carrés

D'après les résultats obtenus à l'aide de pièges photographiques, les densités de tigres peuvent varier de 0,5 à 15 tigres pour 100 kilomètres carrés. Comment expliquer de telles variations d'un habitat à l'autre, me suis-je demandé ? En 1967, le biologiste animalier George Schaller, après avoir observé les tigres du parc national indien de Kanha, estima qu'un tigre prélève annuellement 10 % des proies disponibles sur son territoire. Si, comme l'indiquaient mes premières études télémétriques, un tigre tue une cinquantaine de grandes proies par an, il faut alors que son territoire contienne environ 500 ongulés.

J'ai donc fait l'hypothèse que les densités de proies déterminaient celles des tigres et expliquaient la variabilité de ces dernières.

Entre 1994 et 2003, j'ai cherché à valider cette hypothèse en m'aventurant hors du Malnad et en estimant les densités de tigres et de proies dans diverses réserves naturelles indiennes aux habitats variables – marais, mangroves, forêts à feuillage persistant, etc.

Publiés en 2004, mes résultats accréditaient l'idée qu'un tigre a besoin de la présence de 500 grandes proies.

Ces résultats confortaient aussi mon intuition que la chasse excessive des proies, et non le braconnage des tigres à destination des marchés internationaux, est la principale cause de l'effondrement de l'aire de répartition du tigre au cours des deux derniers siècles.

Connaître la cause principale de ce déclin est essentiel pour avoir une chance de le combattre. Une surveillance locale plus efficace pour empêcher les villageois de chasser les proies de prédilection des

Perché
à 5 mètres du sol,
un fusil à fléchettes
en mains, j'attendais
l'arrivée d'un tigre
de 220 kilos

tigres apparaît cruciale, et certainement plus efficace que l'arrestation de trafiquants de parties corporelles de tigres.

En 2004, je me suis servi de ces nouvelles connaissances sur les densités de population pour étendre le suivi annuel des tigres à d'autres importantes réserves naturelles du Malnad. Répété année après année, le piégeage photographique offre en effet la possibilité de savoir si les effectifs ont augmenté ou diminué, et de déterminer les nombres d'individus gagnés (nés ou immigrants) ou perdus (morts ou émigrés). Cette compréhension d'ensemble, en temps réel, des évolutions des populations constitue le seul moyen de dresser de façon rigoureuse un bilan des efforts faits pour stabiliser les populations de tigres et les redresser.

La comparaison de chaque nouvelle photographie de tigre avec les milliers de photos déjà existantes était une procédure lente et fastidieuse. Nous l'avons automatisée grâce à ExtractCompare, un logiciel de comparaison de motifs mis au point par le mathématicien anglais Lex Hiby et sa société Conservation Research.

8 843 photographies de 888 individus

Vingt-cinq années de piégeage photographique au Malnad ont permis de créer la plus importante base de données photographiques de tigres sauvages : 8 843 photographies correspondant à 888 individus. Lors de chaque campagne photographique, je documente environ 250 tigres vivant dans des réserves qui totalisent quelque 4 000 kilomètres carrés. Certains individus apparaissent année après année, mais la plupart ne le font qu'une ou deux fois, ce qui suggère une rotation élevée au sein de leurs populations. Aujourd'hui, les 400 à 450 tigres de la région du Malnad constituent peut-être la population la plus nombreuse du monde. Mes observations laissent penser que cette région abrite environ cinq fois plus de tigres qu'il y a cinquante ans – le fruit des nombreux efforts investis par les gouvernements locaux et les protecteurs de l'environnement.

Les résultats de ces études de long terme mettent pour la première fois en évidence l'évolution des effectifs de tigres sauvages. Une population bien protégée, telle celle de Nagarahole, n'est pas statique. Sa densité fluctue naturellement sur de longues périodes, entre un point

bas de 7 tigres pour 100 kilomètres carrés et un point haut de 15 tigres sur le même territoire. Même avec une telle densité, la population perd en moyenne 20 % de ses membres chaque année. La violence entre individus, la mise à mort de petits par les mâles concurrents de leurs pères, les blessures de chasse et leurs séquelles, infligent des pertes substantielles. L'abatage de tigres par des agriculteurs qui défendent leur bétail ou par des braconniers qui alimentent le marché noir en parties corporelles de tigre – activités se déroulant même autour des réserves protégées – contribue aussi à cette mortalité. Toutefois, quand les proies sont abondantes, les naissances font plus que compenser ces pertes. Les tigres en surplus essaient de se disperser et de s'établir dans de nouvelles zones.

Ces constatations suggèrent de ne pas se préoccuper en priorité de la mort d'individus – comme le font souvent les protecteurs de l'environnement –, mais plutôt de suivre les populations de tigres dans leur ensemble. Au lieu d'utiliser nos ressources limitées pour éliminer toutes les menaces pesant sur les tigres partout dans leur aire de répartition, nous devrions porter nos efforts sur le maintien des populations sources qui présentent le plus fort potentiel de redressement et d'expansion.

Les territoires des populations sources sont intégrés au sein de zones plus vastes bien moins favorables aux tigres, que l'on nomme zones tampons parce qu'elles absorbent les jeunes tigres résultant du succès reproductif des populations sources. Qu'arrive-t-il à ces animaux ?

Mes campagnes de piégeage photographique au Malnad ont révélé qu'ils se dispersent sur de longues distances. Ainsi, en 2008, le mâle BDT-130 a couvert plus de 180 kilomètres pour se rendre de Bhadra à Anshi-Dandeli ; en 2011, un autre mâle, BPT-241, s'est déplacé sur plus de 280 kilomètres, de Bandipur jusqu'aux forêts du district de Shimoga. De nombreux autres tigres sont passés d'une réserve à l'autre, quand celles-ci étaient assez voisines. Ces données indiquent que les zones tampons permettent à des animaux provenant de populations sources différentes de s'accoupler, ce qui contribue à maintenir la diversité génétique. Ainsi, un aspect important de la préservation des populations sources est le maintien de connexions entre les



habitats, les zones tampons permettant aux tigres de circuler.

Pour compléter ma vision des lieux où vivent des tigres, je décidai d'étendre mon évaluation en recensant un territoire dépassant 4 000 kilomètres carrés (un tiers de la surface de l'Île-de-France). Mais si le piégeage photographique est bien adapté dans une réserve de surface restreinte, il devient trop coûteux et peu réaliste sur de telles étendues. Le suivi des tigres à l'échelle de toute une région doit faire appel à des indices indirects de la présence de l'espèce, tels que la découverte de traces ou de fèces. Ces méthodes permettent d'établir la présence d'animaux, mais pas d'estimer leurs effectifs.

En 2006, j'ai lancé une campagne d'étude de l'occupation de l'habitat par les tigres dans tout le Malnad, soit une aire de 38 350 kilomètres carrés. Les résultats suggèrent que les tigres y vivent sur environ 14 076 kilomètres carrés, soit 66 % des 21 167 kilomètres carrés d'habitat pouvant leur convenir. Cela signifie que ces grands félins ont encore largement de quoi s'étendre dans le Malnad. En outre, les résultats montrent que les zones où la densité de tigres est élevée sont peu accessibles et ont une forte densité de proies. Cette constatation corrobore l'idée qu'il est essentiel, pour la préservation du tigre, de lui éviter la concurrence des chasseurs.

Actuellement, dans le cadre d'une collaboration entre la Société pour la conservation de la faune sauvage et l'Institut indien des statistiques, mes collègues et moi étudions comment on pourrait combiner le piégeage photographique, efficace mais coûteux, avec le suivi traditionnel des traces, moins onéreux, afin d'arriver à de meilleures estimations des populations de tigres à l'échelle de régions entières. Par ces travaux, nous espérons ouvrir de nouvelles perspectives sur l'estimation du nombre de tigres dans les habitats indiens.

La méthode de capture-marquage-recapture photographique et le suivi de présence à grande échelle sont maintenant utilisés dans plusieurs pays asiatiques pour suivre les populations de tigres (beaucoup de chercheurs qui étudient d'autres carnivores insaisissables mais dotés de marquages corporels spécifiques, tels les lycas ou les gloutons, emploient aussi cette méthode). Dans l'ensemble, cependant, bien que l'évaluation scientifique d'une population de tigres ait progressé

L'attaque d'un tigre, un risque non négligeable

Le 12 août 2015, dans un parc animalier à Pékin, une femme sort d'une voiture afin de remplacer le conducteur. En quelques secondes, un tigre vient la saisir et l'emporte, la blesse grièvement et tue l'une de ses proches, accourue pour la secourir. Cet incident tragique rappelle que le tigre est un fauve très dangereux. Une étude prudente estime qu'en Asie, entre 1800 et 2009, 373 000 personnes ont été tuées par des tigres. Chaque année, plusieurs dizaines de villageois indiens sont victimes d'attaques.

■ BIBLIOGRAPHIE

A. M. Gopaldaswamy *et al.*, An examination of index-calibration experiments: Counting tigers at macroecological scales, *Methods in Ecology and Evolution*, vol. 6(9), pp. 1055-1066, 2015.

K. U. Karanth *et al.*, Tigers and their prey: Predicting carnivore densities from prey abundance, *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 101(14), pp. 4854-4858, 2004.

rapidement, l'adoption de ces méthodes par les services de protection gouvernementaux et non gouvernementaux ne suit pas, soit parce que ces méthodes restent incomprises et méconnues, soit parce que les anciennes mettent mieux en valeur les efforts de ces services sur le terrain.

Des chiffres erronés et trop optimistes

Un exemple récent illustre à quel point la confiance en des outils périmés peut être problématique. En avril, le Fonds mondial pour la nature (World Wildlife Fund ou WWF) et le Global Tiger Forum (le Forum mondial pour le tigre) ont annoncé en fanfare que la population de tigres sauvages de la planète, estimée à 3 890 individus, augmentait enfin et doublerait d'ici à 2022.

Leurs décomptes reposent toutefois sur des méthodes erronées, notamment des extrapolations statistiquement douteuses à partir de photographies et de comptages de traces. Cette augmentation prévue est de loin plus optimiste que celle à laquelle on peut s'attendre sur la base des méthodes rigoureuses évoquées ici. De plus, à l'exception des augmentations observées dans quelques réserves naturelles en Inde et dans quelques parties de la Thaïlande, il n'existe pas de données convaincantes montrant que les populations de tigres augmenteraient ailleurs. En réalité, ces dernières années, le Cambodge, le Vietnam et la Chine ont perdu leurs populations viables de tigres, ce que masquent les chiffres avancés concernant les effectifs mondiaux de tigres.

Ces chiffres douteux détournent les acteurs de la conservation du tigre de ce qui devrait être la plus haute priorité: les populations sources sont celles que nous devons surveiller avec vigilance, en utilisant les meilleurs outils scientifiques pour suivre leurs effectifs. Ce n'est qu'avec des décomptes fiables que nous pourrions fixer des objectifs réalistes pour une croissance future, mettre au point des stratégies convenables pour atteindre ces objectifs et mesurer l'impact de nos efforts de préservation. Alors que la sixième extinction massive des espèces est en cours, nous ne pouvons tout simplement ignorer les méthodes fiables de comptage des effectifs développées par les biologistes. La conservation des espèces rares et discrètes, telle celle du majestueux félin qu'est le tigre, en dépend. ■

La simulation numérique au service du son 3D

Matthieu Aussal et François Alouges

Un univers sonore comme si vous y étiez, mais avec un simple casque d'écoute : grâce notamment à des méthodes efficaces pour résoudre numériquement certaines équations, ce rêve des techniques de réalité virtuelle se concrétise enfin.



L'ESSENTIEL

- On cherche à reproduire fidèlement et en temps réel des scènes sonores, de façon que l'auditeur, muni d'un simple casque, perçoive la direction et la distance de chacune des sources de sons.
- Cela nécessite entre autres la détermination de fonctions, nommées HRTF, qui caractérisent l'influence de la forme de la tête et des oreilles de l'auditeur sur le son perçu.
- On sait aujourd'hui calculer avec efficacité ces fonctions, plutôt que les mesurer en laboratoire, ce qui est fastidieux et coûteux.

© Eshkin / Shutterstock.com

Avec la révolution numérique, des techniques qui relevaient autrefois de la science-fiction s'introduisent dans nos vies et se banalisent rapidement. Il en est ainsi de la visualisation de scènes en relief, ou visualisation 3D. Une décennie a suffi pour que les cinémas, suivis de la télévision ou des jeux vidéo, soient conquis, et l'on a assisté à l'essor de casques de réalité virtuelle qui immergent leur porteur dans une scène visuelle d'aspect réaliste où il peut se déplacer. Même si des applications autres que récréatives (conception assistée par ordinateur, aide au diagnostic médical, entraînement de chirurgiens, etc.) sont encore en développement, le potentiel de

■ LES AUTEURS



Matthieu AUSSAL est ingénieur de recherche au Centre de mathématiques appliquées (CMAP) de l'École polytechnique, à Palaiseau.

François ALOUGES est professeur de mathématiques appliquées au CMAP.

Matthieu Aussal a reçu en 2015 le prix AMIES (Agence pour les mathématiques en interaction avec l'entreprise et la société) pour sa thèse de doctorat.

LE SYSTÈME WAVE FIELD SYNTHESIS (WFS), ou Synthèse de front d'ondes, ici celui de l'Ircam à Paris, utilise un grand nombre de haut-parleurs pour créer dans l'espace des « hologrammes sonores », c'est-à-dire des sources virtuelles donnant l'impression que c'est d'elles, et non des haut-parleurs, qu'émane le son.

ces systèmes laisse peu de doutes quant à leur avenir.

Ces casques de visualisation immersive commencent à livrer des informations acceptables et persuasives pour notre système visuel. Mais il n'en est pas de même pour ce qui est des informations fournies à notre système auditif.

De quoi s'agit-il ? Au même titre que nos yeux nous permettent de voir en trois dimensions, nos oreilles nous fournissent, inconsciemment et en continu, des informations spatiales contenues dans le son, notamment sur la position et le mouvement des sources sonores. Lorsque ces informations auditives sont absentes, voire contradictoires avec les informations visuelles, notre système cognitif le supporte mal. Parfois, il supprime même l'illusion offerte par le dispositif de réalité virtuelle, ce qui rend désagréable l'expérience vécue par l'utilisateur et peut même provoquer des nausées.

La compréhension des mécanismes physiques et physiologiques de la spatialisation sonore est donc indispensable pour offrir une expérience immersive, complète et persuasive de réalité virtuelle : s'il est facile de comprendre que nos deux yeux voient la même scène d'un point de vue légèrement différent, il est beaucoup plus difficile de savoir ce qu'entend exactement chacune de nos oreilles lorsque nous sommes plongés dans une scène sonore.

Parmi les nombreuses recherches consacrées à ce sujet, l'une des démarches consiste à simuler par ordinateur, à l'aide de modèles mathématiques, la propagation des ondes sonores, de la source du son jusqu'au

conduit auditif de l'oreille. Ces simulations numériques, qui sont l'objet du présent article, peuvent en effet livrer des résultats comparables à ceux des mesures effectuées en laboratoire, mais avec davantage de souplesse et de répétabilité, pour un coût modique. Ces « expériences numériques » autorisent la confrontation d'hypothèses, la validation ou l'invalidation de modèles, et fournissent des données utiles pour les applications destinées au grand public.

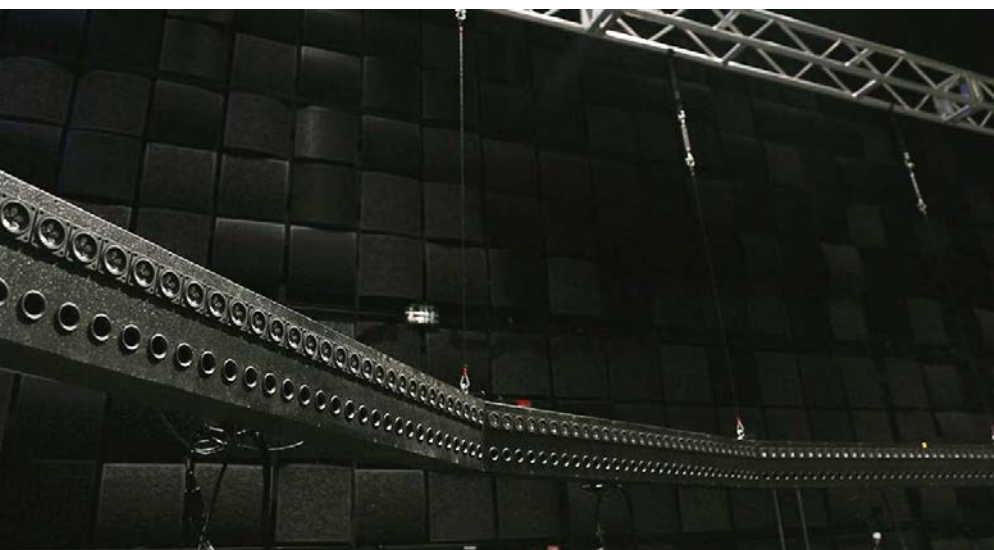
Pour mieux comprendre l'intérêt des recherches sur le son 3D et l'approche par la simulation numérique, rappelons qu'il existe déjà sur le marché des dispositifs réalisant une spatialisation du son, au moyen d'un ensemble de haut-parleurs diffusant chacun un canal sonore approprié. Les chaînes *home cinema* 5.1 ou 7.1, voire les 64 canaux proposés par le système Atmos de Dolby, en sont des exemples. Ces dispositifs permettent de positionner virtuellement des objets sonores autour de l'auditeur, en jouant par exemple sur des différences d'intensité entre les haut-parleurs, des effets de retard ou de réverbération. C'est une sorte de généralisation du système de stéréophonie bien connu.

Un rendu spatial avec juste un casque

D'autres techniques plus récentes, telles que la HOA (*High Order Ambisonics*, « ambisonie d'ordre élevé ») ou la WFS (*Wave Field Synthesis*, ou « synthèse de front d'ondes »), fonctionnent sur des principes équivalents, quoique plus complexes dans leur formalisme mathématique.

Cependant, tous ces systèmes sont confrontés à la même limitation : la précision du rendu spatial est directement proportionnelle au nombre d'enceintes. Ils restent donc encombrants, malgré les efforts de miniaturisation. Aussi, bien que ces dispositifs soient tout indiqués pour équiper de grands volumes (salles de cinéma, auditoriums, salles de spectacle, etc.), ils sont incompatibles avec la portabilité et la mobilité des casques de réalité virtuelle. Il faut donc se tourner vers la technique de spatialisation sonore adaptée, à savoir la « synthèse binaurale » sur casque audio.

L'écoute binaurale désigne les perceptions auditives engendrées par une stimulation sonore des deux oreilles. L'idée de la synthèse binaurale est donc de synthétiser le son adéquat destiné à chaque oreille.



Lorsqu'un son est émis dans l'espace, il arrive généralement un peu plus tôt et avec une intensité un peu plus élevée à l'une des deux oreilles (voir la figure ci-contre). Cela fournit à notre système cognitif deux indices sur la direction de la source émettrice. On les nomme ITD (*Interaural Time Delay*, « différence interaurale de temps ») et ILD (*Interaural Level Difference*, « différence interaurale d'intensité »).

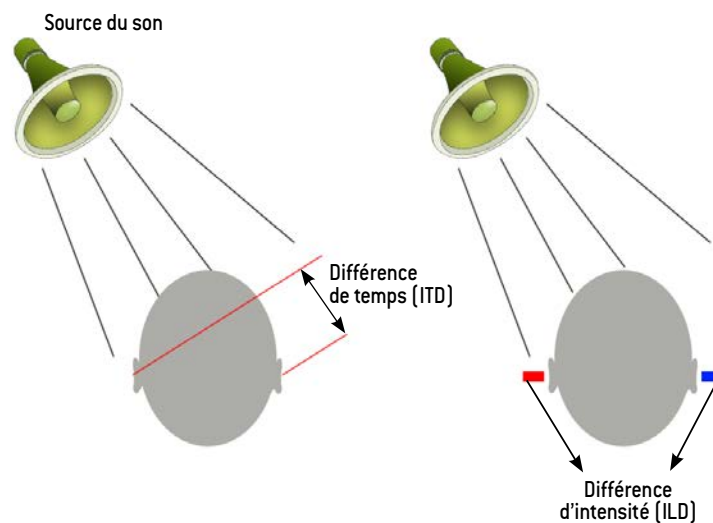
Mais ces indices de localisation sont insuffisants. Par exemple, ils ne permettent pas de différencier la provenance de sources sonores situées à la même distance des deux oreilles, c'est-à-dire dans le plan sagittal qui passe entre les oreilles. Pourtant, nous sommes capables de discriminer efficacement de telles sources sonores, provenant du dessus, de devant, de derrière, etc. Comment fait notre cerveau ?

Pour l'expliquer, il faut d'abord savoir que tout son peut être vu comme une superposition d'ondes acoustiques sinusoïdales, et que la propagation d'une telle onde dans un milieu est perturbée par les détails géométriques des obstacles qu'elle rencontre.

Ce phénomène de diffraction dépend de la longueur d'onde (distance entre deux pics successifs de l'onde sinusoïdale considérée). Des détails géométriques petits par rapport à la longueur d'onde modifient peu la propagation : l'onde correspondante n'y est pas sensible. Inversement, des détails géométriques de taille comparable ou supérieure à la longueur d'onde modifient notablement la propagation et perturbent l'acoustique. C'est d'autant plus le cas quand la forme de l'objet est complexe, comme pour le pavillon de l'oreille.

La forme de la tête et des oreilles joue

Lorsqu'un son émis par une source se propage jusqu'au tympan, la forme de la tête et des oreilles de l'auditeur diffractent toutes ses composantes dont les longueurs d'onde sont, pour l'essentiel, inférieures au mètre. En termes de fréquences, cela se traduit par une modification du spectre pour toutes les fréquences supérieures à quelques centaines de hertz – c'est-à-dire une modification des amplitudes et phases des ondes correspondant à ces fréquences. Il s'ensuit que les différents tons qui composent le signal sonore initial



LA DIRECTION DE LA SOURCE SONORE se traduit dans divers indices physiques dont se sert le cerveau pour la déterminer. Deux d'entre eux sont la différence interaurale de temps (ITD) et la différence interaurale d'intensité (ILD), qui mesurent les différences, entre les deux oreilles, du temps d'arrivée du son et du niveau perçu.

seront perçus avec des intensités relatives différentes de celles de l'émission. Or deux sons provenant d'endroits différents ne rencontrent pas les mêmes obstacles et les mêmes détails. Ils sont donc modifiés différemment. Ce troisième indice, judicieusement exploité par notre cerveau, vient compléter la panoplie perceptive et enrichit profondément notre capacité à localiser les sons dans tout l'espace.

Par extension, deux personnes ayant des morphologies – en particulier d'oreilles – différentes n'entendent pas de la même façon, surtout dans les hautes fréquences. Ainsi, chacun a son propre univers sonore !

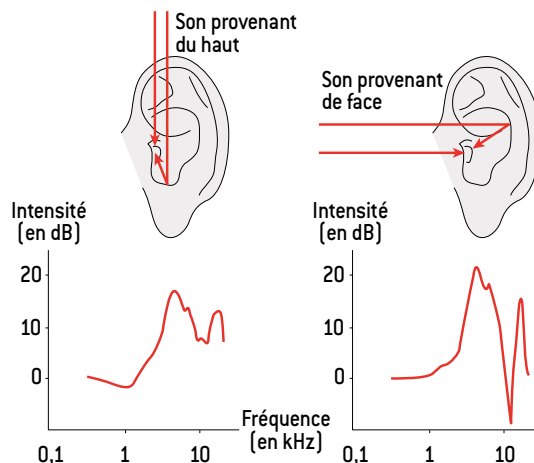
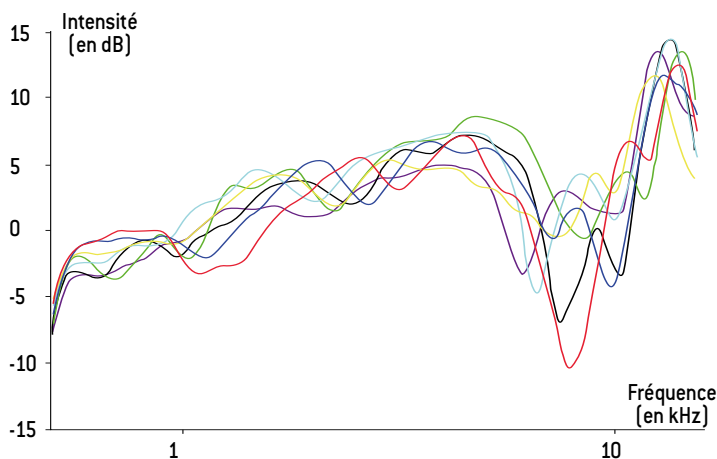
Du théâtrophone à la synthèse binaurale

En synthèse binaurale, on cherche à exploiter les indices de localisation portés par l'ITD, l'ILD et les déformations fréquentielles que nous venons de mentionner. Ces trois indices sont codés dans un ensemble de fonctions nommées HRTF (*Head-Related Transfer Functions*, c'est-à-dire « fonctions de transfert relatives à la tête »).

Plus précisément, les fonctions HRTF relient, pour chaque fréquence sonore et chaque direction d'incidence, la pression acoustique à l'entrée du canal auditif à la pression acoustique que l'on mesurerait en l'absence de l'auditeur, au milieu du volume qu'occuperait la tête de ce dernier. Ces fonctions constituent des « filtres », qui caractérisent mathématiquement les transformations acoustiques dues à la morphologie de la tête, et sur la base desquelles on réalise la synthèse binaurale.

Fréquence et longueur d'onde

La fréquence f est liée à la longueur d'onde λ par la relation $f = c/\lambda$, où c est la vitesse de propagation. Pour le son, cette vitesse est égale, dans l'air, à 340 mètres par seconde.



POUR UNE DIRECTION D'INCIDENCE donnée, le son qui parvient au pavillon de l'oreille dépend de la morphologie de la tête de l'auditeur et de son pavillon (à gauche, différentes courbes correspondant à différents

auditeurs). Les variations sont plus importantes pour les sons aigus (plus de 1 kHz). Pour un même individu, on a aussi des variations selon la direction d'incidence (graphiques de droite).

Avant d'expliquer plus précisément en quoi consiste la synthèse binaurale, on peut retracer brièvement sa préhistoire. La première expérience de spatialisation sonore remonte à la fin du XIX^e siècle, avec le théâtrophone (1881) de Clément Ader. Il s'agissait du premier service de retransmission en direct de spectacles, combinant à la fois téléphonie et stéréophonie (voir l'illustration ci-dessous).

Dans les années 1930, l'ingénieur britannique Alan Blumlein introduisit l'enregistrement stéréophonique, tandis que le physicien américain Harvey Fletcher déposa un brevet décrivant un système de téléphone binaural.

L'idée du système de Fletcher était d'utiliser une tête artificielle pour effectuer une prise de son binaurale, à l'aide d'un microphone placé au creux du pavillon de chaque oreille du mannequin, ce dernier devant imiter au mieux la morphologie humaine. Les ondes sonores sont alors diffractées par les détails morphologiques du mannequin, et le son ainsi transformé est enregistré par les microphones. Cet enregistrement stéréophonique particulier peut ensuite être écouté sur n'importe quel casque audio, ce qui donne un résultat souvent spectaculaire (écouter par exemple *Virtual Barber Shop*, sur www.youtube.com/watch?v=IUDTlvagjJA).

Il faut souligner que la sensation d'espace procurée par le dispositif de Fletcher est uniquement perceptive: il n'y a pas de restitution physique d'un quelconque champ sonore, contrairement aux systèmes d'enceintes évoqués précédemment. Toutefois, même si l'approche de Fletcher reste aujourd'hui inégalée en termes de fidélité, tant pour le respect des timbres que pour le rendu spatial, elle nécessite *de facto* un enregistrement préalable à la restitution. Elle ne peut donc pas être interactive. Ainsi, ce procédé n'est pas utilisable dans des conditions de réalité virtuelle, où le système doit être dynamique, avec une adaptation en temps réel aux positions des sources et de l'auditeur.

Aussi, depuis les années 2000, avec l'essor de la puissance des ordinateurs, une

seconde méthode – la synthèse binaurale – a vu le jour dans de nombreux laboratoires, en France (l'Ircam, le Laboratoire d'acoustique musicale, France Telecom, consortium Bili, etc.) et à l'étranger (institut Fraunhofer en Allemagne, université de Californie à Davis, projet Orpheus, etc.). Afin de la mettre en œuvre, il faut d'abord déterminer les filtres HRTF d'un sujet (ou d'un mannequin de morphologie suffisamment proche). Pour ce faire, on place ce dernier au centre d'une sphère de plusieurs mètres de diamètre sur laquelle sont répartis des haut-parleurs. Pour chacun de ces émetteurs sonores, on mesure le son capté par des microphones placés dans les oreilles du sujet. De l'ensemble de ces mesures on déduit les fonctions HRTF.

Vient ensuite la synthèse binaurale proprement dite: si l'on veut donner à l'auditeur la sensation qu'un son provient d'une direction donnée, il suffit de traiter le son en question avec le filtre HRTF correspondant à cette direction. Pour un son numérisé, cela revient à effectuer un calcul sur ce son et à transmettre le résultat au casque de l'auditeur.

De longues mesures expérimentales...

Ainsi, par cette méthode, tout contenu sonore peut être spatialisé, au prix d'un effort de calcul. Mais la tâche reste raisonnable, car le traitement numérique est réalisable sur un ordinateur standard, voire un téléphone mobile. De plus, lorsqu'on effectue ledit calcul en temps



LE THÉÂTROPHONE conçu par Clément Ader retransmettait le son capté par deux microphones placés sur la scène de l'opéra ou du théâtre: une sorte de stéréophonie en direct, par téléphone.

réel, la spatialisation peut tenir compte à la fois de la position de l'auditeur, de celle de la source sonore et de leur orientation relative. En cela, la synthèse binaurale est parfaitement adaptée aux systèmes de réalité virtuelle.

La synthèse binaurale semble attrayante, mais plusieurs difficultés expliquent qu'elle peine à se concrétiser en dehors des laboratoires de recherche.

Tout d'abord, les mesures des filtres HRTF sont par nature discrètes, ponctuelles: elles ne couvrent pas tout l'espace, car on n'a évidemment pas un haut-parleur pour chaque point de la sphère qui entoure l'auditeur. Il faut donc interpoler ou extrapoler les valeurs des filtres HRTF, ce qui peut nuire à la qualité du rendu sonore 3D. De plus, les mesures sont entachées d'erreurs, en raison de la complexité du dispositif mis en œuvre.

Par ailleurs, on effectue généralement les mesures dans des environnements dont l'acoustique est contrôlée, souvent en chambre sourde (c'est-à-dire avec des murs absorbants qui éliminent les réflexions). Seul le son direct émis par la source est alors mesuré: l'environnement ne joue pas de rôle. Or notre capacité à localiser les sons est bien plus efficace dans une pièce où les nombreuses réflexions, sur les murs et sur les objets qui s'y trouvent, sont autant d'indices qui permettent à notre cerveau de localiser rapidement et avec précision la source sonore. L'effet de l'environnement est donc à prendre en compte.

... remplacées par des simulations numériques

On peut contourner ces principaux facteurs limitants de la synthèse binaurale à l'aide de la simulation numérique de la propagation des sons. La physique de la propagation des ondes est modélisée par des équations dont les plus connues (et les plus simples) sont celles dites de d'Alembert et de Helmholtz (voir l'encadré ci-dessus).

Or on peut calculer les filtres HRTF en résolvant numériquement ces équations pour des ondes sonores qui se propagent vers une tête humaine, celle-ci étant aussi représentée par un modèle numérique. On utilise ensuite ces HRTF, déterminées par des « mesures numériques », en lieu et place des HRTF déterminées par des « mesures analogiques » de laboratoire. On lève ainsi deux des verrous précédemment

Équations de d'Alembert et de Helmholtz

L'équation qui régit l'évolution de la pression acoustique P (une fonction de la position (x, y, z) et du temps t) dans un milieu homogène (l'air ambiant) et se propageant à vitesse c s'écrit :

$$\partial^2 P / \partial t^2 - c^2 \Delta P = 0,$$

où $\partial^2 P / \partial t^2$ est la dérivée seconde de P par rapport au temps t , en supposant les autres variables (x, y, z) constantes (c'est une « dérivée partielle »), et ΔP désigne l'expression $\partial^2 P / \partial x^2 + \partial^2 P / \partial y^2 + \partial^2 P / \partial z^2$.

Cette équation des ondes, dite de d'Alembert, est linéaire, c'est-à-dire que la somme de deux solutions est encore une solution. En cherchant des solutions particulières de la forme :

$$P(x, y, z, t) = u(x, y, z) e^{i 2\pi f t},$$

expression qui correspond à une onde stationnaire oscillant à la fréquence f , on

trouve que la fonction u doit obéir à l'équation dite de Helmholtz :

$$\Delta u + k^2 u = 0,$$

où $k = 2\pi f / c$ est le « nombre d'onde ». Cette équation aux dérivées partielles est elle aussi linéaire. Cette propriété permet, en utilisant des techniques du calcul intégral datant de la fin du XIX^e siècle, de transformer l'équation de Helmholtz en une équation comportant des intégrales où n'interviennent que les valeurs prises par la fonction u sur la frontière du domaine, qui est une surface. Cette formulation sous la forme d'une équation intégrale présente plusieurs avantages pour la résolution numérique, notamment celui de réduire considérablement la partie de l'espace qu'il faut discrétiser.

POUR MESURER EXPÉRIMENTALEMENT les filtres HRTF qui caractérisent l'influence de la forme de la tête sur les sons perçus, on utilise une tête artificielle, où un petit microphone est inséré dans chaque oreille.



© Neumann

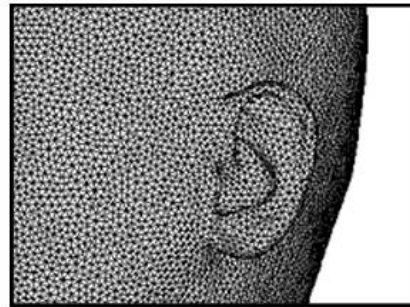
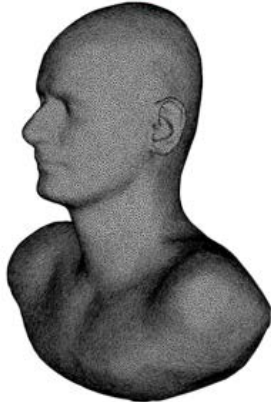
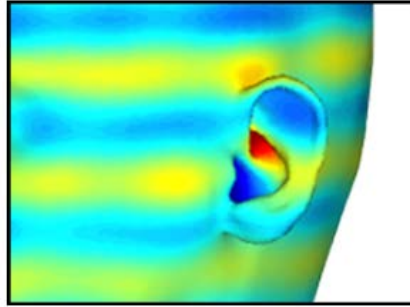
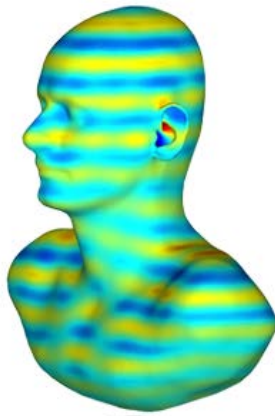
évoqués pour la synthèse binaurale, à savoir le caractère discret, non continu, des mesures de laboratoire et les erreurs qui les affectent.

Cette approche est très attrayante, car elle ne nécessite pas de matériel complexe de mesure ni d'ordinateur particulièrement puissant. De plus, on peut personnaliser le calcul en utilisant un modèle numérique de la tête d'un auditeur particulier, et obtenir des résultats suffisamment fins pour éviter d'avoir à interpoler les valeurs des HRTF.

Le troisième verrou, lié à la prise en compte de la réverbération (les réflexions des ondes sonores), peut aussi être levé en résolvant cette fois un modèle de propagation d'ondes dans une salle. En fonction du modèle choisi et des éventuelles simplifications appliquées à la physique du problème, on peut même envisager que ce calcul soit effectué en temps réel.

Résoudre l'équation des ondes

En pratique, la précision des HRTF nécessite une résolution précise des équations de propagation, tandis que le calcul de la réverbération peut être plus grossier. Cela s'explique notamment par la taille respective des détails géométriques à modéliser: la physique liée aux pavillons des oreilles est bien plus subtile que celle liée aux murs plans d'une pièce.

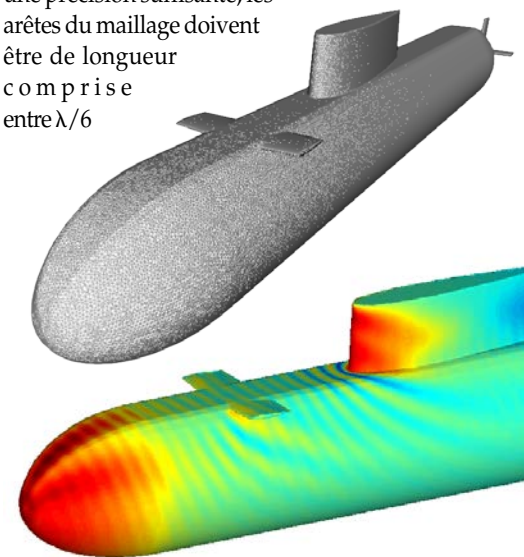


LA PRESSION ACOUSTIQUE à la surface d'un auditeur virtuel, due à une onde sonore de fréquence 8 kilohertz se propageant de haut en bas (les couleurs foncées représentent les pressions maximales en valeur absolue). On voit que le son est amplifié au niveau du tympan. C'est le résultat d'une résolution numérique des équations des ondes effectuée à l'aide du logiciel MyBEM, développé à l'École polytechnique par les auteurs. Le calcul exige une discrétisation fine, comme le montre le maillage [réalisation du projet SYMARE] du buste et de la tête.

définie par un maillage suffisamment fin et géométriquement adapté. Les nœuds du maillage sont les points où les valeurs (approchées) de la fonction-solution seront déterminées. On recherche ensuite ces valeurs en supposant que la fonction-solution approchée est la somme de fonctions simples et connues, choisies dans un ensemble approprié. Cette méthode, où l'on peut justifier mathématiquement l'existence et l'unicité de la solution approchée, est aujourd'hui un outil fondamental de calcul numérique dans le monde industriel.

Prenons l'exemple d'un problème d'acoustique en domaine fréquentiel, c'est-à-dire la propagation d'une onde sonore sinusoïdale, de fréquence bien définie (équation de Helmholtz, voir l'encadré page 45). La méthode des éléments finis consistera ici à définir un maillage du volume où se propage l'onde sonore. Ce maillage servira de base au calcul d'une solution approchée représentant la pression acoustique.

À cause de la nature oscillante de la solution recherchée, pour atteindre une précision suffisante, les arêtes du maillage doivent être de longueur comprise entre $\lambda/6$



© M. Aussal et F. Alouges

Toutefois, afin que la résolution numérique soit précise et fiable, il faut connaître les limites des méthodes et algorithmes utilisés. Ce qui nécessite une compréhension profonde des modèles mathématiques associés (la propagation des ondes sonores), ainsi que des phénomènes sous-jacents (la diffraction). Il est généralement impossible de trouver des solutions « analytiques » (des expressions mathématiques compactes) à l'équation de propagation des ondes. D'où la nécessité de la résoudre numériquement, par une méthode adaptée. Celle-ci, mise en œuvre dans un logiciel et exécutée par un ordinateur, fournira une approximation de la solution théorique exacte. Cette démarche est caractéristique des mathématiques appliquées, dans un grand nombre de domaines scientifiques et techniques.

La simulation numérique de la propagation d'ondes est un sujet déjà bien documenté puisqu'il a de nombreuses applications. Acoustique architecturale, conception de véhicules militaires furtifs, influence de champs d'éoliennes sur les radars, étude de la pollution sonore, etc. : la propagation d'ondes sonores ou électromagnétiques intervient dans d'innombrables questions, et la simulation numérique fournit souvent des informations utiles tout en évitant le

recours à des expériences coûteuses ou difficilement réalisables.

Quelles sont les méthodes utilisées pour résoudre numériquement l'équation qui décrit la propagation des ondes ? Cette équation est une « équation aux dérivées partielles », c'est-à-dire une équation reliant la fonction à déterminer, qui dépend de plusieurs variables, à ses dérivées.

Construire un maillage adapté de l'espace

Depuis les années 1950, la méthode dite des éléments finis fournit un cadre mathématiquement rigoureux pour le calcul approché des solutions de ce type d'équations. En pratique, l'idée générale est d'abord de découper l'espace en petits morceaux : on discrétise le domaine où l'équation est

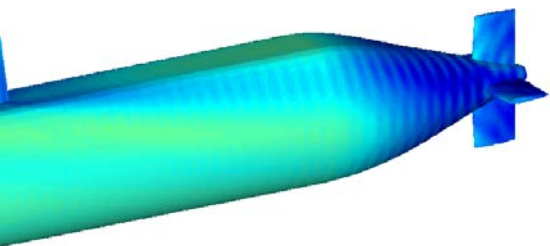
LES MÉTHODES NUMÉRIQUES développées pour la synthèse de son 3D s'appliquent à de nombreux autres domaines, par exemple l'étude de la détectabilité d'un sous-marin recherché à l'aide d'un sonar. Le résultat d'un calcul de la pression acoustique sur la surface du sous-marin, pour une onde sonar venant de l'avant, est représenté ici, avec le maillage [réalisé par ESI Group] qui a été utilisé.

et $\lambda/12$, où λ est la longueur d'onde considérée. Il s'ensuit que pour des fréquences élevées (courtes longueurs d'onde), le nombre de sommets du maillage se révèle souvent prohibitif. Ainsi, le maillage d'une pièce mesurant $3 \times 4 \times 2,5$ mètres avec des mailles cubiques de 0,5 centimètre de côté comporterait environ 240 millions de sommets, ce qui donnerait lieu à un système d'équations à 240 millions d'inconnues !

Il est possible de réduire l'ampleur de la tâche. En effet, des manipulations mathématiques permettent de donner à l'équation des ondes une formulation en termes d'intégrales où la fonction inconnue n'intervient plus que par les valeurs qu'elle prend sur la frontière du domaine de propagation (voir l'encadré page 45). Ainsi, pour une onde sonore se propageant dans un milieu ouvert où se trouve l'auditeur, seules interviennent dans l'équation intégrale les valeurs prises par la fonction inconnue sur la surface de l'auditeur.

Un calcul ramené à une surface finie

La résolution numérique de cette équation intégrale surfacique nécessite une écriture mathématique et une algorithmique sous-jacente plus complexes que les méthodes volumiques. Mais l'avantage est que seule la surface de l'objet soumis aux ondes doit être discrétisée, et non tout le volume de propagation. Dans le cas de la pièce de quelques mètres envisagée plus haut où est placé l'auditeur, on réduit ainsi le nombre d'inconnues de 240 millions à seulement quelques millions. Et de façon plus générale, comme la formulation intégrale ramène un problème posé dans tout l'espace (infini) à un problème posé sur une surface finie, sa résolution numérique est



bien plus précise que celle de l'équation aux dérivées partielles.

Le développement de méthodes performantes pour résoudre numériquement ces équations intégrales a démarré un peu avant les années 2000 et est un champ de recherche encore très actif. Citons les noms de trois méthodes rapides adaptées aux problèmes de propagation d'ondes et aujourd'hui utilisées dans la recherche et l'industrie : les méthodes multipolaires rapides, inventées à l'université Yale par Leslie Greengard et Vladimir Rokhlin en 1988, la méthode des matrices hiérarchiques, inventée en 1999 par Wolfgang Hackbusch, de l'institut Max-Planck à Leipzig, et la *sparse cardinal sine decomposition*, que nous avons conçue en 2013.

Toutes ces méthodes permettent de réduire très sensiblement le temps de calcul et la mémoire nécessaires à la résolution de formulations intégrales pour la propagation des ondes, ce qui rend aujourd'hui le calcul numérique des HRTF accessible sur un ordinateur usuel. Typiquement, il faut compter une dizaine d'heures pour calculer tous les filtres HRTF avec une précision suffisante pour les applications.

Le calcul numérique des HRTF ouvre la voie à une meilleure compréhension du lien entre ce que perçoit un auditeur et ses détails morphologiques, en particulier les formes de ses oreilles et de sa tête. Il est facile, en utilisant le modèle numérique, de déformer les oreilles ou la tête d'un sujet virtuel, puis de construire une base de données exhaustive des formes possibles. On pourra alors proposer une famille de HRTF adaptées à chacun. Plus généralement, ces approches numériques aideront à améliorer la spatialisation sonore des casques de réalité virtuelle, mais aussi, pourquoi pas, les prothèses auditives ou les dispositifs de guidage de personnes malvoyantes.

Enfin, de l'autre côté du spectre, la généralité de l'outil mathématique développé le rend applicable à de nombreux autres problèmes de propagation d'ondes. Ainsi, le même logiciel et les mêmes algorithmes de calcul de HRTF permettent de simuler efficacement la propagation d'ondes sonores dans un théâtre, des ondes émises par un sonar en milieu aquatique (voir la figure ci-contre), des ondes radar (électromagnétiques) auxquelles cherche à échapper un avion furtif, etc. Un vaste champ d'applications ! ■

MyBino, un logiciel gratuit pour son 3D

L'équipe X-Audio du Centre de mathématiques appliquées de l'École polytechnique a développé un logiciel de rendu binaural gratuit, à destination des professionnels du son et du grand public. Issu d'une collaboration avec les ingénieurs du son du Conservatoire national de musique et danse de Paris (CNSMDP), cet outil permet de mixer et d'écouter des enregistrements sonores contenant jusqu'à 48 canaux avec un simple casque audio. Il a été conçu pour maximiser la sensation d'externalisation des sons, tout en réduisant le plus possible les artefacts de traitement audibles (www.cmap.polytechnique.fr/xaudio/mybino).

■ BIBLIOGRAPHIE

F. Alouges et M. Aussal, *The sparse cardinal sine decomposition and its application for fast numerical convolution*, *Numerical Algorithms*, vol. 70(2), pp. 427-448, 2015.

M. Aussal, *Méthodes numériques pour la spatialisation sonore, de la simulation à la synthèse binaurale*, thèse de doctorat, École polytechnique, 2014.

J.-C. Nédélec, *Acoustic and Electromagnetic Equations: Integral Representations for Harmonic Problems*, Springer, 2001.

D. R. Begault et L. J. Trejo, *3-D sound for virtual reality and multimedia*, rapport NASA/TM-2000-209606, 2000.

J. Blauert, *Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization*, MIT Press, 1997.

L'amertume sentinelle du système immunitaire

Robert Lee et Noam Cohen

Les récepteurs du goût amer ne se trouvent pas seulement sur la langue. Présents dans tout l'organisme, ils forment... une première ligne de défense contre les infections !

Imaginez votre pire rhume. Le nez complètement bouché, vous avez du mal à respirer. La pression sur les sinus est telle que votre tête semble sur le point d'éclater. Vous avez perdu l'odorat, et la nourriture a la saveur du carton. Au bord de la nausée, vous êtes dans un état pitoyable. À présent, imaginez que les symptômes, même s'ils s'estompent au bout d'une semaine, réapparaissent toujours. Vous n'arrivez jamais à vous en débarrasser. Jamais.

C'est malheureusement le lot des patients atteints de sinusite chronique – ou rhinosinusite chronique en jargon médical. Cette maladie du nez et des voies aériennes supérieures affecte environ 35 millions d'Américains. En Europe, 11 % des 15-75 ans sont concernés – selon une étude publiée en 2011 par le Réseau global européen sur l'allergie et l'asthme (GA²LEN) à partir d'un questionnaire posé dans 19 villes européennes –, avec des disparités selon les régions : seulement 7 % à Helsinki, en Finlande,

L'ESSENTIEL

- Les protéines qui détectent l'amertume sont présentes sur la langue, mais aussi dans des organes jamais en contact avec les aliments.
- Nommées récepteurs gustatifs, ces protéines déclenchent des mécanismes de défense ultrarapides qui tuent les bactéries.
- Stimuler ces récepteurs à l'aide de substances amères pourrait renforcer les défenses immunitaires naturelles et réduire notre dépendance aux antibiotiques.

© Science Source



LES RÉCEPTEURS DE L'AMERTUME,
présents sur les papilles
de la langue (*en orange*
sur cette section
de un millimètre),
interviennent aussi
dans la lutte
contre les bactéries.

■ LES AUTEURS



Robert J. LEE est professeur assistant au sein du service d'otorhinolaryngologie, chirurgie de la tête et du cou et du service de physiologie de la faculté de médecine Perelman à l'université de Pennsylvanie, aux États-Unis.

Noam A. COHEN est maître de conférences au sein du service d'otorhinolaryngologie de l'université de Pennsylvanie.

13% à Montpellier, et le maximum observé à Coimbra, au Portugal, avec 27%. Pour se soigner, nombre de personnes prennent des antibiotiques et des stéroïdes de manière prolongée. Si le traitement n'a aucun effet, ils subissent une intervention chirurgicale délicate, consistant à nettoyer les cavités sinusiennes infectées – une opération de plus en plus courante aujourd'hui à cause, semble-t-il, de la prise excessive d'antibiotiques qui diminue leur efficacité. Actuellement, aux États-Unis, une prescription d'antibiotique sur cinq est destinée à un patient souffrant de rhinosinusite. Cette maladie fait désormais partie d'un cercle vicieux contribuant à l'apparition de bactéries extrêmement dangereuses, tel le staphylocoque doré résistant à la méticilline.

Tel est le point de départ de notre histoire : nous voulons rompre ce cycle infernal. Comme de nombreux autres scientifiques, nous cherchons à comprendre les mécanismes de défense immunitaire que déploient les cellules épithéliales tapissant les parois internes des voies aériennes lors des infections respiratoires. Une personne inspire en moyenne plus de 10 000 litres d'air par jour, la plupart du temps par le nez. Cet air contient un nombre incalculable de bactéries, de champignons et de virus. Le nez est la première ligne de défense de l'appareil respiratoire. À chaque inspiration, particules de débris, virus, bactéries et spores fongiques y sont pris au piège. Pourtant, la plupart des gens vivent en respirant librement, sans souffrir d'aucune infection des voies respiratoires.

Nous aurions un agent jusque-là insoupçonné de cette immunité sur le bout de la langue – au sens propre. Celle-ci est en effet parsemée de protéines – nommées récepteurs gustatifs – qui non seulement

ce qui repousse les envahisseurs. Ensuite, les récepteurs déclenchent la libération, par des cellules, de monoxyde d'azote, qui tue les bactéries. Enfin, ils signalent à d'autres cellules de produire des protéines antimicrobiennes nommées défensines.

Plus surprenant encore, des chercheurs ont découvert ce type de récepteurs non seulement sur la langue et dans le nez, mais aussi ailleurs dans les voies respiratoires, de même que dans le cœur, les poumons, les intestins et d'autres organes. Avec d'autres scientifiques, nous pensons désormais que ces récepteurs font partie d'un système immunitaire inné différent de celui que l'on connaissait, fondé sur l'action d'anticorps et de cellules circulant dans l'organisme – et potentiellement plus rapide. En effet, des heures, voire des jours, sont parfois nécessaires pour produire des anticorps spécifiques contre des virus ou des bactéries. La réponse des récepteurs gustatifs, bien que d'action plus générale, moins ciblée sur des bactéries particulières, se produit, elle, en quelques minutes. Il s'agit là d'un véritable système d'alerte précoce.

Le goût du danger

On peut voir les récepteurs gustatifs comme des sentinelles qui réagissent aux substances pénétrant dans l'organisme. Sous cet angle, ils ont toute leur place dans le système immunitaire. À la surface des cellules formant les papilles gustatives de la langue, par exemple, les récepteurs déclenchent l'envoi au cerveau de signaux l'informant de la valeur nutritionnelle ou de la toxicité potentielle de la nourriture que nous mettons dans la bouche. La langue détecte cinq saveurs fondamentales : l'amer, le sucré, le salé, l'acide et l'umami (un terme emprunté au japonais, qui signifie savoureux et désigne le goût conféré aux aliments par un acide aminé, le L-glutamate, et divers nucléotides, présents en quantité dans des aliments tels que les sauces de poisson fermenté, la sauce soja, les champignons, les tomates mûres ou les épinards). Notre perception du goût agit ainsi comme le gardien du système digestif : elle fournit des informations sur les aliments que nous mangeons, nous permettant de décider si nous pouvons ou non les avaler.

Les récepteurs de l'amertume détectent la présence de poisons végétaux, notamment les alcaloïdes, une classe de molécules dont

La réponse des récepteurs de l'amertume contre une invasion bactérienne se produit en quelques minutes

détectent les saveurs amères, mais aussi nous protègent des bactéries. Nos recherches ont montré que ces récepteurs, également présents dans le nez, déclenchent trois types de réponses contre les bactéries. D'abord, ils envoient des signaux qui activent le battement de cils (de minuscules protubérances) à la surface des cellules de la paroi nasale,

font partie la strychnine et la nicotine. Ces saveurs que nous qualifions d'amères sont souvent perçues comme désagréables par le cerveau, car l'évolution a sélectionné des récepteurs qui signalent des substances potentiellement dangereuses.

Prévenir ce type de danger est une clé de la survie, ce qui expliquerait pourquoi autant de récepteurs de l'amertume existent. Le sucré, le salé, l'acide et l'umami n'ont chacun qu'une seule sorte de récepteur. En revanche, au moins 25 types de récepteurs détectent les composés amers. Connus sous le nom de récepteurs de type 2, ou T2R, ils reconnaissent une grande variété de poisons, nous empêchant de les avaler – un avantage considérable, qui a probablement été sélectionné au fil de l'évolution.

Les premiers indices d'un rôle de ces récepteurs ailleurs que sur la langue sont apparus en 2009, lorsque des biologistes de l'université de l'Iowa ont découvert des

récepteurs T2R sur des cellules épithéliales qui tapissent les poumons. Une couche de mucus collant à la surface de ces cellules piège les microbes et les éléments irritants inhalés. Leur présence active les minuscules cils des cellules, lesquels se mettent alors à vibrer de façon synchrone, au rythme de 8 à 15 battements par seconde. Ces mouvements repoussent les éléments irritants vers la gorge, d'où ils sont soit avalés, soit recrachés. L'équipe américaine a découvert que les cils des cellules pulmonaires vibraient plus vite lorsque des composés amers stimulaient leurs récepteurs T2R, ce qui suggérait que ces récepteurs T2R aident les voies respiratoires à se débarrasser des substances inhalées potentiellement toxiques qui, dans la bouche, ont une saveur amère.

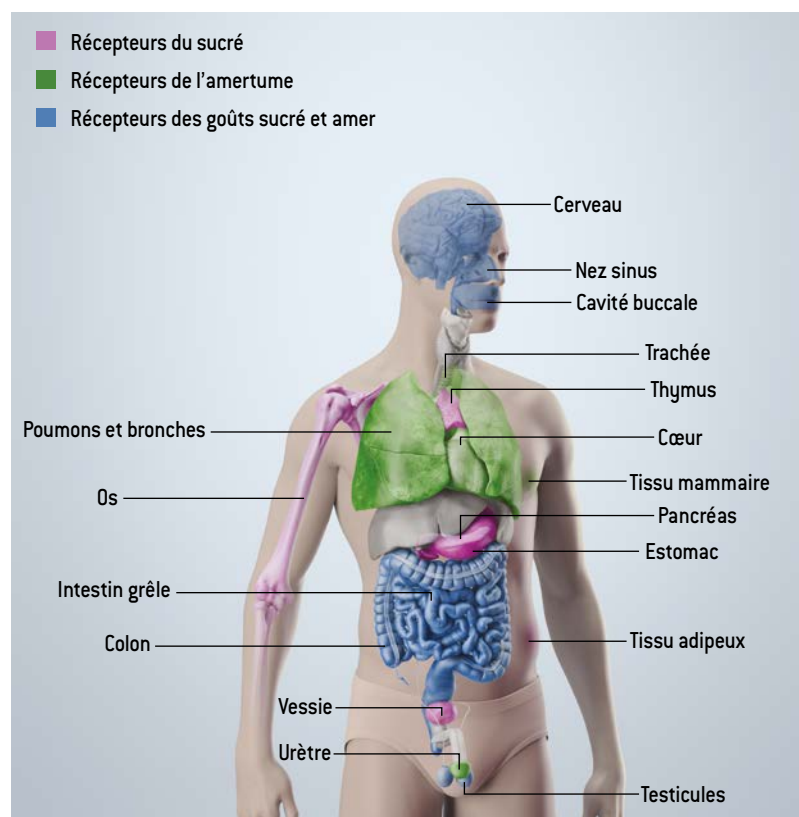
À peu près à la même époque, des chercheurs du Campus médical Anschutz de l'université du Colorado étudiaient des

récepteurs de l'amertume découverts dans le nez du rat, sur un type particulier de cellules réagissant aux agents irritants. Ils ont observé que ces cellules, dites cellules chimiosensorielles solitaires, deviennent plus actives lorsqu'elles détectent des molécules bactériennes nommées AHL (acyl-homosérine lactones). Ces molécules sont libérées par de dangereuses bactéries du groupe dit à Gram négatif (une technique de marquage, la coloration de Gram, distingue deux grands groupes de bactéries – à Gram négatif et à Gram positif – selon les caractéristiques de leur enveloppe) lorsque ces microbes forment des biofilms.

Les biofilms sont des communautés de bactéries telles que *Pseudomonas aeruginosa* qui se collent les unes aux autres en sécrétant une matrice protectrice, ce qui les rend 1000 fois plus résistantes aux antibiotiques que les bactéries moins organisées, et donc plus difficiles à éliminer. Les chercheurs du Colorado ont montré que les molécules AHL produites par un biofilm stimulent l'activité des cellules chimiosensorielles solitaires. Ainsi, pour la première fois, on observait qu'une substance spécifique des bactéries stimule des cellules portant des récepteurs de l'amertume. L'idée que ces récepteurs réagissent peut-être eux-mêmes aux envahisseurs extérieurs commençait à faire son chemin.

DES RÉCEPTEURS DU GOÛT DANS TOUT L'ORGANISME

Bien que leur nom provienne du rôle qu'ils remplissent sur la langue, les récepteurs de l'amertume et du sucré ont récemment été détectés sur de nombreux organes et tissus qui ne sont jamais en contact avec la nourriture. Dans au moins certaines de ces parties de l'organisme, en particulier les voies respiratoires, ces récepteurs gustatifs jouent un rôle important dans l'immunité.



Des super-goûteurs super-résistants

En 2011, intrigués par ces découvertes, nous avons commencé à rechercher des récepteurs gustatifs dans les cellules épithéliales du nez chez l'homme, en collaboration avec des experts du goût travaillant au Centre Monell des sens chimiques, à Philadelphie, une institution en matière de recherche sur l'odorat et le goût. Au départ, nos travaux n'étaient qu'un petit projet annexe visant à déterminer si nous pouvions localiser des récepteurs de l'amertume dans les cellules nasales, comme l'avait fait l'équipe de l'Iowa dans les poumons. Mais cette étude est vite devenue l'objet de toute notre attention lorsque nous nous sommes aperçus que des récepteurs gustatifs affectaient peut-être la sensibilité de certaines personnes à la rhinosinusite.

Au cours de l'étude, nous nous sommes intéressés à un récepteur de l'amertume en particulier : T2R38, le plus connu de la

famille T2R. Il existe plusieurs variants de la protéine humaine T2R38, dus à de légères différences (des polymorphismes) dans la séquence du gène qui code la protéine. Nous avons découvert que les variants les plus communs de ce récepteur sont présents dans les cils tapissant le nez et les sinus.

La découverte de cette variabilité inter-individuelle nous a conduits à explorer comment les différentes formes du récepteur T2R38 influent sur le comportement

des cellules du sinus et du nez. En particulier, deux formes ont un effet très différent sur le goût lorsqu'elles sont présentes sur la langue : l'une est un détecteur de goût très sensible, l'autre pas du tout. Environ 30% des personnes de type caucasien héritent de deux copies du gène codant le variant insensible (une de chaque parent) ; elles se révèlent être des « non-goûteurs », c'est-à-dire ne réagissant pas à certains composés amers. Environ 20% des personnes

de type caucasien sont dotées de deux copies du gène codant le variant très sensible de T2R38, et perçoivent ces mêmes composés comme extrêmement amers ; on les nomme des « super-goûteurs ». Les individus portant un exemplaire de chaque gène se situent entre ces deux extrêmes.

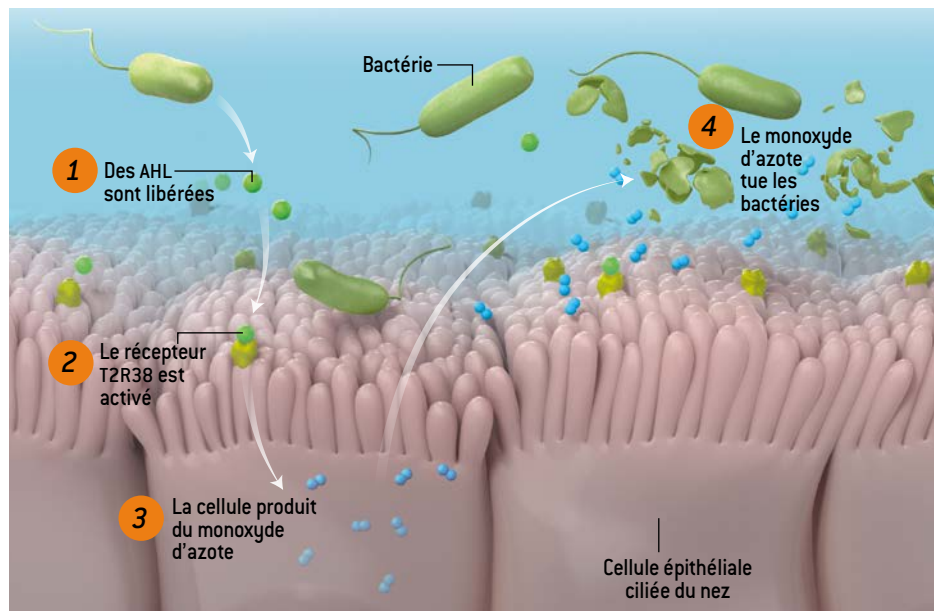
En examinant des tissus prélevés lors d'interventions chirurgicales dans les sinus et le nez, nous avons comparé le comportement de cellules nasales présentant

L'AMERTUME AU SECOURS DES VOIES RESPIRATOIRES

Les cellules qui tapissent les voies respiratoires humaines interviennent dans la défense de l'organisme contre les invasions bactériennes. Deux types cellulaires en particulier utilisent les récepteurs de l'amertume de différentes façons pour détecter et repousser les intrus.

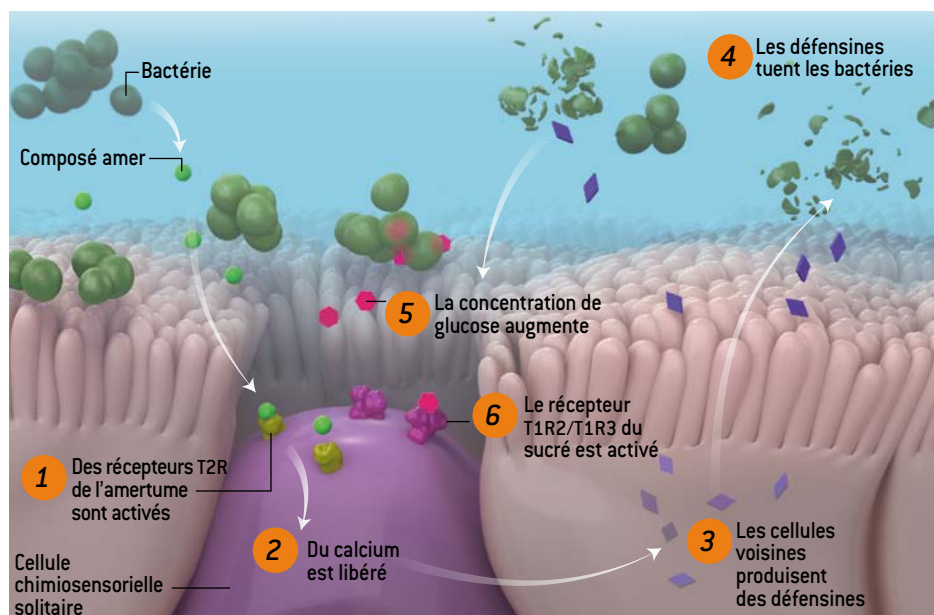
UNE RÉACTION À FLEUR DE PEAU

Lorsque les bactéries à Gram négatif infectent le nez, elles libèrent des composés nommés acyl-homosérine lactones ou AHL (1). Ces molécules sont détectées par une classe de récepteurs de l'amertume, les T2R38, à la surface des cils vibratiles qui coiffent les cellules des parois internes du nez (2). Ces cellules – les cellules épithéliales du nez – répondent à la détection des AHL en libérant du monoxyde d'azote (3). Ce gaz diffuse jusqu'aux bactéries et les tue (4). Les cils se mettent aussi à vibrer, chassant les bactéries.



DÉFENSINES À LA RESCOUSSE

D'autres cellules, dites chimiosensorielles solitaires, portent à la fois des récepteurs de l'amertume (T2R) et du sucré (T1R2/T1R3). Les bactéries infectieuses libèrent un composé que des récepteurs de l'amertume détectent à la surface d'une de ces cellules (1). En réaction, la cellule libère du calcium (2) qui signale aux cellules voisines de produire des protéines, les défenses (3). Celles-ci endommagent et tuent les bactéries (4). La concentration en substances sucrées, tel le glucose, augmente alors (5), car les bactéries ne s'en nourrissent plus. Des récepteurs du sucré détectent le glucose (6) et réduisent l'activité des récepteurs de l'amertume.



l'une ou l'autre de ces deux formes de la protéine (nous avons déterminé quel type les cellules exprimaient en séquencant leurs gènes). Afin d'activer les récepteurs, nous avons exposé les cellules à un composé, le phénylthiocarbamide, souvent utilisé pour les tests gustatifs du récepteur T2R38. Et nous avons constaté que contrairement aux cellules des patients non goûteurs, celles des super-goûteurs produisaient du monoxyde d'azote en quantité.

Cette découverte allait elle aussi dans le sens d'un lien entre goût et immunité. Le monoxyde d'azote combat les bactéries de deux façons lorsque celles-ci atteignent les voies respiratoires. Il stimule les cellules de ces voies pour accroître la fréquence de battement des cils ou il tue directement les bactéries. Les molécules de monoxyde d'azote formant un gaz, elles ont la capacité de se répandre rapidement en dehors des cellules qui tapissent les voies respiratoires et d'atteindre le mucus, puis les bactéries. Une fois à l'intérieur, elles endommagent membranes, enzymes et ADN. En général, nos sinus produisent de grandes quantités de monoxyde d'azote qui se propagent *via* les voies respiratoires, ce qui contribue à éviter les infections.

Ces deux modes d'activité antibactérienne nous ont amenés à penser que certaines versions du récepteur T2R38 altéraient peut-être la sensibilité des personnes aux infections respiratoires aiguës. Et en effet, au laboratoire, nous avons découvert que le monoxyde d'azote produit par les cellules nasales de super-goûteurs au cours de l'activation du récepteur T2R38 accélérerait les battements ciliaires et tuait davantage de bactéries que les cellules nasales issues d'individus non goûteurs.

Nous avons aussi constaté que les molécules bactériennes AHL (ces molécules qui activent les cellules chimiosensorielles nasales chez la souris) activent directement les récepteurs humains T2R38. Les cellules nasales de super-goûteurs détectent l'AHL par l'intermédiaire des récepteurs T2R38 et produisent du monoxyde d'azote, contrairement aux cellules des non-goûteurs. Ces propriétés font des cellules des super-goûteurs de meilleures tueuses de bactéries productrices d'AHL que ne le sont celles des non-goûteurs. À partir de ces

Les cellules nasales des super-goûteurs éliminent mieux certaines bactéries que celles des non-goûteurs

Sinusite chronique : plusieurs facteurs ?

La piste des récepteurs de l'amertume n'est pas la seule envisagée pour expliquer cette pathologie. Certaines hypothèses favorisent un facteur environnemental – la colonisation du nez par un champignon ou une bactérie, une inflammation chronique due à une modification des microbes qui peuplent la cavité nasale. D'autres (dont celle des récepteurs gustatifs) penchent pour un défaut de la première ligne de défense du système immunitaire, la barrière immunitaire innée. Il est probable que les deux facteurs contribuent. *

observations, nous avons conclu que les cellules épithéliales des voies respiratoires utilisent le récepteur d'amertume T2R38 pour détecter une activité bactérienne et activer les défenses immunitaires.

Depuis la découverte du récepteur T2R38 dans les cils des cellules épithéliales nasales humaines, notre compréhension du rôle des récepteurs gustatifs du nez s'est encore améliorée.

Des récepteurs similaires à ceux détectés chez la souris sont aussi présents sur des cellules chimiosensorielles solitaires du nez humain. Ces cellules sont dites solitaires, car bien que dispersées dans toute la cavité nasale, elles ne représentent qu'environ 1 % des cellules de la région. Elles portent à la fois des récepteurs de l'amertume T2R et du goût sucré, T1R2/T1R3. Nous avons observé que lorsque les récepteurs T2R de ces cellules sont stimulés, elles envoient un signal aux cellules environnantes, les incitant à libérer, dans le mucus des voies respiratoires, des protéines antimicrobiennes nommées défensines. Ces molécules ont la capacité de tuer de nombreuses bactéries pathogènes, y compris *Pseudomonas aeruginosa* et le staphylocoque doré résistant à la pénicilline.

Une première arme immédiate

Quant aux récepteurs du goût sucré, ils stoppent l'activité des récepteurs de l'amertume lorsqu'ils sont stimulés, ce qui empêche les cellules de libérer trop de défensines. D'autres équipes avaient déjà repéré des récepteurs du goût sucré dans d'autres régions de l'organisme. Dans le pancréas, notamment, ces récepteurs détectent le sucre dans le sang et activent la production d'insuline, laquelle régule la concentration sanguine de glucose. Notre travail sur les cellules nasales, cependant, a mis en évidence le rôle conjoint et opposé des récepteurs de l'amertume et du sucré au sein d'une même cellule.

Ces expériences suggèrent que les récepteurs du goût constituent un système d'alerte précoce de la défense immunitaire dans les voies respiratoires. Ils diffèrent

Les multiples rôles du récepteur du sucré

Les récepteurs de l'amertume ne sont pas les seuls agents du goût dont le rôle se révèle bien plus vaste que la perception d'une saveur. Depuis quelques années, les découvertes dans ce sens s'accumulent concernant le récepteur du sucré.

La perception du goût sucré est réalisée en bouche grâce à un récepteur qui signale la présence de nutriments riches en énergie. Ce récepteur unique, identifié au début des années 2000, est composé de l'association de deux sous-unités appelées T1R2 et T1R3. Il détecte les composés sucrés, tels les sucres naturels (saccharose, fructose, glucose), les édulcorants de synthèse (saccharine, aspartame, cyclamate, sucralose) ou naturels (extraits de la stévia, du fruit du moine) et certaines rares protéines au goût sucré très intense (brazzéine, thaumatine, monelline).

De façon inattendue, après sa découverte dans les bourgeons du goût, le récepteur T1R2/T1R3 a été mis en évidence dans de nombreux tissus et organes, en dehors de la bouche – notamment l'intestin, le pancréas, la vessie, mais aussi le cerveau, les tissus adipeux, le cœur, l'épithélium respiratoire nasal et les reins. Le récepteur est même présent dans certains globules blancs (les lymphocytes B).

Bien que son rôle physiologique reste à établir dans de nombreux tissus, diverses études ont déjà révélé une grande variété de fonctions. Au sein du pancréas et des tissus du tractus gastro-intestinal, le récepteur du goût sucré est impliqué dans la détection du

glucose, la régulation de l'expression d'un transporteur de glucose, la cinétique de libération de l'insuline et le maintien de l'équilibre (l'homéostasie) glucidique. Dans la vessie, le récepteur T1R2/T1R3 contribuerait aux contractions de cet organe lors de la miction. On observe aussi que des souris génétiquement privées du récepteur T1R2/T1R3 ont des adipocytes plus petits – ces cellules qui stockent l'énergie sous forme de graisse. Cela suggère que le récepteur interviendrait dans la régulation du stockage de l'énergie. Le récepteur du goût sucré dans le cerveau, enfin, semble impliqué dans la détection du glucose; il permet probablement d'adapter au mieux le cerveau en cas de d'irrigation sanguine insuffisante.

Toutes ces découvertes ouvrent de nouvelles perspectives, notamment pour utiliser le récepteur du goût sucré comme cible thérapeutique dans le traitement de l'obésité et du diabète de type 2. Dans de nombreux cas, le rôle physiologique du récepteur au goût sucré reste à démontrer. Cependant, la stimulation excessive du

LE FRUIT DU MOINE, issu d'une plante grimpante du sud de la Chine nommée *Siraitia grosvenorii*. L'impact de cet édulcorant naturel sur le fonctionnement du récepteur du sucré reste à déterminer.

récepteur par les édulcorants, qu'ils soient naturels ou non, est soupçonnée d'être à l'origine d'un dérèglement de notre contrôle métabolique pouvant conduire à l'obésité ou au diabète de type 2.

D'autres interrogations concernent la fertilité masculine. Récemment, la sous-unité T1R3 (en l'absence de T1R2) a été observée dans les organes reproducteurs mâles et les spermatozoïdes humains. Chez la souris, une étude a montré que lorsqu'on inhibe la sous-unité T1R3 à l'aide d'une molécule, les souris mâles deviennent stériles et subissent des changements pathologiques de leurs organes reproducteurs. Or certains herbicides largement utilisés en agriculture sont connus pour se comporter comme des inhibiteurs du récepteur humain du goût sucré. Les herbicides perturberaient-ils la fertilité masculine par ce biais?

Les récepteurs du goût ont probablement encore beaucoup à nous révéler.

– **Loïc Briand**

Directeur de recherche Inra au Centre des sciences du goût et de l'alimentation, à Dijon

des protéines de détection précoce les mieux connues, les récepteurs de type Toll ou TLR. Ces protéines activent elles aussi une réponse immunitaire lorsqu'elles sont stimulées par certaines molécules bactériennes, comme cela semble être le cas avec les récepteurs T2R. Mais avec une différence de taille : certaines réponses des TLR – par exemple l'activation de la production d'anticorps destinés à marquer les envahisseurs en vue de leur destruction – sont beaucoup plus lentes et s'étalent sur des heures, voire des jours entiers. En revanche, les récepteurs T2R38 et leurs cousins détecteurs d'amertume déclenchent des réponses en quelques minutes, voire quelques secondes. Ces récepteurs du goût seraient en quelque sorte une première arme, déjà chargée et prête à tirer, du système immunitaire : ils joueraient un rôle primordial au tout début de l'infection en déclenchant une réaction immédiate. D'autres récepteurs immunitaires prendraient le relais en cas d'infection prolongée, rassemblant les troupes lorsque la première réponse n'a pas été suffisante.

Des personnes vulnérables

Le fait que les variants génétiques des récepteurs de l'amertume soient si nombreux rend leur rôle dans l'immunité encore plus intrigant. La plupart des 25 récepteurs présentent des variations génétiques qui augmentent ou diminuent leurs capacités. Les personnes qui en sont dotées sont ainsi plus ou moins sensibles aux substances amères. Si la réaction à l'amertume est bien l'une des composantes de la réponse



immunitaire face aux invasions bactériennes, ces mêmes variations génétiques devraient se traduire par des différences dans la façon dont les gens combattent les infections. Un récepteur de l'amertume qui produit une forte réponse protégerait mieux contre les infections qu'un récepteur déclenchant une faible réponse, lequel accroîtrait la susceptibilité aux maladies infectieuses.

Nous avons commencé à tester cette hypothèse sur des personnes et nos premiers résultats suggèrent qu'elle est correcte. Les millions de patients atteints de rhinosinusite chronique constituent une population tout indiquée pour ce test, d'autant plus que ce groupe a besoin d'aide. Lorsqu'elles répondent à un questionnaire sur leur qualité de vie, les personnes souffrant de rhinosinusite obtiennent des scores bien plus mauvais que les patients atteints de plusieurs maladies pulmonaires ou cardiaques. De plus, elles ont tendance à développer de graves infections pulmonaires ou d'autres pathologies des voies respiratoires telles que l'asthme.

Nous avons examiné des cultures microbiennes produites à partir de prélèvements effectués sur des personnes atteintes de sinusite chronique. Ces cultures ont révélé que si les super-goûteurs ne sont pas immunisés contre les rhinosinusites, ils souffrent beaucoup moins que les non-goûteurs d'infections nasales dues à des bactéries à Gram négatif. Cela paraît logique, car celles-ci produisent des AHL, ces molécules qui, en activant les récepteurs, conduisent les cellules à libérer du monoxyde d'azote, létal pour les microbes. En revanche, contre des bactéries ne produisant pas ces molécules, ce mécanisme de défense ne peut fonctionner.

D'autres essais cliniques sont aussi en faveur d'un rôle des récepteurs T2R38 dans la sensibilité aux sinusites. Deux études menées dans notre groupe montrent que les personnes dotées de deux copies du variant super-goûteur du gène codant T2R38 sont moins susceptibles de contracter de graves rhinosinusites que les patients ayant deux copies du variant non-goûteur, ou même que ceux portant une copie de chaque variant. Une étude de l'otorhinolaryngologiste Martin Desrosiers, du Centre hospitalier de l'université de Montréal, et de ses collègues a par ailleurs vérifié que le variant non-goûteur est plus souvent détecté chez les patients atteints d'une rhinosinusite chronique que chez les personnes en bonne

santé. Ces chercheurs ont de plus montré que la gravité de la rhinosinusite est associée à des variants de deux autres types de récepteurs T2R, nommés T2R14 et T2R49.

Dans les organes autres que le nez, les liens entre récepteurs du goût et immunité commencent à apparaître. En 2014, une étude a montré qu'en présence de bactéries *Escherichia coli* pathogènes, les cellules chimiosensorielles des voies urinaires stimulent la prostate *via* des récepteurs T2R, ce qui libère l'urine. S'agirait-il d'un mécanisme d'expulsion des bactéries? Une autre étude récente a montré que les globules blancs – des acteurs clés du système immunitaire – détectent aussi les molécules AHL des bactéries du genre *Pseudomonas* à l'aide de récepteurs T2R38.

La piste du chou de Bruxelles

À présent, nous examinons si des composés chimiques qui activent les récepteurs T2R fonctionneraient comme médicaments contre la rhinosinusite en déclenchant une réponse immunitaire plus forte susceptible d'éliminer les bactéries. Ainsi, les nombreux composés amers présents dans la nourriture pourraient avoir des fonctions thérapeutiques. Citons les humulones et les lupulones – des acides présents dans la bière à base de houblon –, les isothiocyanates des légumes verts tels que les choux de Bruxelles, et les substances amères des agrumes, telle la limonine. Une étude a notamment montré que l'absinthine, le principe amer de l'absinthe, stimule les récepteurs T2R des cellules chimiosensorielles solitaires. Au laboratoire, nous travaillons sur plusieurs mélanges qui pourraient avoir une action thérapeutique. De nouveaux traitements à base de composés amers permettront peut-être un jour de combattre les infections sans recourir aux antibiotiques.

Le goût ou l'analyse génétique des récepteurs T2R pourraient aussi être utilisés pour prédire la sensibilité aux infections. Les variations naturelles au sein de ces récepteurs gustatifs aideraient à répondre à l'éternelle question : pourquoi certaines personnes sont-elles sujettes aux infections respiratoires tandis que d'autres semblent ne jamais tomber malades? Élucider le problème grâce aux récepteurs de l'amertume serait une victoire particulièrement... savoureuse. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

R. J. Lee et N. A. Cohen, **Taste receptors in innate immunity**, *Cellular and Molecular Life Sciences*, vol. 72(2), pp. 217-236, 2015.

R. J. Lee et al., **Bitter and sweet taste receptors regulate human upper respiratory innate immunity**, *Journal of Clinical Investigation*, vol. 124(3), pp. 1393-1405, 2014.

N. D. Adappa et al., **The bitter taste receptor T2R38 is an independent risk factor for chronic rhinosinusitis requiring sinus surgery**, *International Forum of Allergy & Rhinology*, vol. 4(1), pp. 3-7, 2014.

S. C. Kinnamon, **Taste receptor signaling – From tongues to lungs**, *Acta Physiologica*, vol. 204(2), pp. 158-168, 2012.

Pergélisol et climat

Les chiffres de la menace



Le dégel du sol arctique va vraisemblablement accélérer le réchauffement climatique pendant le XXI^e siècle. Un réseau mondial de chercheurs s'active afin d'évaluer à quel point.

Edward Schuur

LA TOUNDRA, savane arctique, abonde en terres humides et en sols gelés remplis de matière organique, dont le dégel accélérera probablement le réchauffement climatique.

L'ESSENTIEL

- Les pergélisols sont des sols gelés en permanence. La matière organique qui s'y est accumulée au fil des millénaires n'a jamais pu se décomposer totalement.
- Avec le dégel de plus en plus fréquent de ces sols en Arctique, la matière organique se décompose et émet des gaz à effet de serre.
- Un réseau international de chercheurs a notamment pour objectif de quantifier ces émissions, qui vont amplifier le réchauffement climatique dû à l'emploi des combustibles fossiles.

© Carl Johnson/Design Pics - Getty Images

Début avril en Alaska, par une belle journée froide. Le bloc de 20 kilogrammes de neige et de glace durcie m'échappe et atterrit dans un grand craquement au fond de la fosse que je suis en train de creuser. À genou sur le bord de la tranchée, je me redresse pour reprendre mon souffle et étirer mes reins endoloris, que renforce une ceinture lombaire. Avec cinq collègues, je suis en train d'extraire des tonnes de neige au pied de la quatrième des barrières à neige que nous avons installées sur une colline. Nous évacuons la neige extraite sur des traîneaux.

En association avec d'autres, notre équipe conduit en effet des essais sur une parcelle expérimentale située aux marges du parc national Denali, en plein centre de l'Alaska. Il s'agit de réchauffer un peu le sol pendant l'hiver, afin d'étudier les éventuels effets du changement climatique dans la région. Pour ce faire, nous nous sommes contentés de construire des barrières de 1,5 mètre de haut et longues de 8 mètres sur une colline aux pentes douces de la toundra. La neige s'y est accumulée, protégeant notre sol expérimental des températures négatives extrêmes de l'air hivernal. Le printemps est arrivé et nous voulons maintenant étudier le dégel du sol de notre station expérimentale dans les mêmes conditions que celles que connaissent les sols de la toundra environnante. Il nous faut donc éviter en particulier que la fonte des congères accumulées au pied des barrières ne le sature en eau. Nous évacuons donc la neige des congères. Dur travail!

L'objectif du Réseau mondial de suivi terrestre du pergélisol (*Global Terrestrial Network for Permafrost*), dont fait partie notre laboratoire, est de mieux appréhender l'évolution des immenses surfaces de sols gelés en permanence, type de sol nommé pergélisol ou permafrost. En gardant notre sol moins froid en hiver, son dégel est plus

précoce et plus étendu en été. C'est exactement ce à quoi on s'attend avec l'augmentation des températures, qui est deux fois plus rapide dans les écosystèmes arctiques et boréaux que sur le reste du globe.

Un pergélisol contient de la roche, de la terre gelée et de la glace, de sorte que lorsqu'il se réchauffe, il dégèle plutôt qu'il ne fond. Tel un hamburger retiré du congélateur, il se ramollit sans pour autant se liquéfier. Ce processus réactive les microorganismes qu'il contient, qui se mettent à décomposer les résidus de plantes et d'animaux accumulés dans la terre gelée au cours des millénaires. Cela libère du dioxyde de carbone (CO₂) et du méthane (CH₄).

Les sols des régions qui entourent le pôle Nord contiennent tant de matière organique que la transformation de seulement une fraction de cette masse en gaz à effet de serre suffirait à accélérer considérablement le réchauffement climatique. Les essais que nous menons en Alaska constituent une partie importante de l'ensemble des recherches coordonnées à travers le monde afin de jauger l'importance de cet effet. Or nous commençons à en savoir assez pour faire des estimations fiables.

Estimer le dégel du pergélisol en Arctique

Comment quantifier le dégel du pergélisol et ses conséquences ? Il faut commencer par déterminer la masse de sol susceptible de dégeler, estimer la vitesse de son dégel et évaluer l'impact des émissions de carbone associées sur le changement climatique. Cela implique la prise en compte d'une surface énorme : 16,7 millions de kilomètres carrés de l'hémisphère Nord (l'hémisphère Sud est couvert d'océans aux hautes latitudes et comporte donc peu de pergélisols), soit presque un quart de la surface des terres



Sans mention contraire, les photos sont de Brian Adams



émergées non recouvertes de glace. Or l'épaisseur d'un sol gelé peut atteindre des dizaines, voire des centaines de mètres...

Même si les satellites ou d'autres dispositifs de télédétection peuvent suivre l'évolution des calottes glaciaires – celles du Groenland par exemple –, il n'existe aucune méthode de suivi à distance des régions de pergélisol. Depuis des années, les chercheurs surveillent des capteurs installés en divers endroits, mais ils n'ont pas encore pu recueillir assez de données. Aussi, nous continuons à installer des capteurs. Le Réseau mondial de suivi terrestre du pergélisol exploite ainsi plus de un millier de forages équipés d'instruments afin de surveiller l'évolution de la température dans les premiers mètres du sol et plus en profondeur.

Les résultats de ce suivi suggèrent que le pergélisol s'est petit à petit réchauffé au cours des dernières décennies, atteignant en de nombreux endroits des records en 2014 et en 2015. Les augmentations les plus spectaculaires se sont produites là où les températures du sol étaient très basses depuis longtemps, c'est-à-dire comprises en permanence entre $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nous avons aussi observé des augmentations de température dans les pergélisols plus proches du point de congélation ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$), dont les températures sont comprises entre $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, là où une variation de 1 degré seulement peut avoir un impact important.

DEUX CHERCHEURS prélèvent une carotte de sol arctique dégelé à la station de recherche d'Eight Miles Lake, en Alaska, en septembre 2016 (ci-dessus). La terre ainsi recueillie est d'une couleur sombre, car elle est très chargée en matière organique (ci-dessus à droite). Des capteurs à infrarouges placés au sein de chambres à multiples réflexions mesurent les émissions de dioxyde de carbone par le sol (page suivante, à gauche); une chercheuse enregistre les données ainsi produites (page suivante, à droite).

Aux quelques endroits où la température du pergélisol est tout juste inférieure à $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, la couche active – le sol proche de la surface qui dégèle pendant l'été et regèle l'hiver – s'épaissit. La compilation des données de température provenant du monde entier donne une bonne vision d'ensemble des changements de la température du sol en Arctique.

50 kilogrammes de carbone par mètre cube

La quantité de pergélisol susceptible de dégeler n'est qu'une partie du calcul à effectuer. Nous avons aussi besoin de savoir combien de matière organique contient le sol qui se ramollit. Afin de le déterminer, au printemps dernier nous avons prélevé dans le sol de notre station expérimentale d'Eight Mile Lake des carottes de terre longues de 1,5 mètre – comme nous l'avions déjà fait à plusieurs reprises depuis le lancement de notre projet il y a dix ans.

Nos mesures et celles d'autres équipes montrent que chaque premier mètre cube de sol de toundra contient environ 50 kilogrammes de carbone sous forme de matière organique. Ce type de carbone, qui provient des organismes végétaux ou animaux partiellement décomposés, s'oppose au carbone inorganique lié à la roche, peu susceptible d'être affecté par les changements

■ L'AUTEUR



Edward SCHUUR est professeur d'écologie à l'université de l'Arizona du Nord, aux États-Unis, et chercheur principal du réseau international Permafrost Carbon Network.



de température. Cette quantité représente environ 5 fois celles contenues dans les sols non gelés et 100 fois celles stockées dans les arbustes et autres végétaux qui arrivent à vivre en Arctique.

Au total, on estime que les pergélisols de l'hémisphère Nord, qui ne couvrent que 15 % des sols de la planète, contiennent entre 1 330 milliards et 1 580 milliards de tonnes de carbone organique. Celui-ci peut se trouver à des dizaines de mètres de profondeur dans le sol. Si l'on se limite aux trois premiers mètres, le carbone des pergélisols représente la moitié de la masse totale de carbone contenue dans les trois premiers mètres de sol de l'ensemble des terres émergées et à près du double de la masse du carbone atmosphérique (essentiellement sous forme de CO_2 et CH_4).

Afin de préciser encore leurs idées, les chercheurs ont entrepris aussi de déterminer les masses de carbone organique où cela n'a pas encore été fait, notamment dans les sols marins peu profonds bordant certaines côtes arctiques. Ces pergélisols sous-marins se dégradent lentement à mesure que l'eau de mer les pénètre. Nous ignorons à ce stade combien de carbone organique ils pourraient contenir. Les épais couches sédimentaires des vastes deltas des fleuves arctiques contiennent aussi beaucoup de carbone, mais cela n'a été mesuré que sur quelques sites. Pour le moment, la meilleure estimation

que nous puissions donner est qu'environ 400 milliards de tonnes de carbone organique non pris en compte à ce stade pourraient se trouver dans ces divers endroits mal explorés.

Étant donné les masses énormes de carbone organique contenues dans le pergélisol, il semble plausible que son dégel libérera d'énormes volumes de gaz à effet de serre. Comment les quantifier ? Il faut pour cela répondre à trois questions clés.

Combien de gaz émis, et lesquels ?

Premièrement, quelle est la proportion de carbone qui sera transformée en gaz à effet de serre ? Les microorganismes du sol ne métabolisent et ne libèrent qu'une partie du carbone organique du sol. Une partie reste donc dans le sol, soit parce qu'elle est inaccessible, soit parce qu'elle est difficilement métabolisable par les microbes.

Deuxièmement, à quelle vitesse l'activité microbienne libère-t-elle des gaz ? Du carbone se décomposant rapidement peut se retrouver dans l'atmosphère en moins d'une année après le dégel. Toutefois, la plus grande partie du carbone, celui qui fait partie de matières organiques seulement à moitié décomposées, ne sera vraisemblablement libérée que bien plus tard, à mesure de l'avance du travail microbien au cours des décennies.

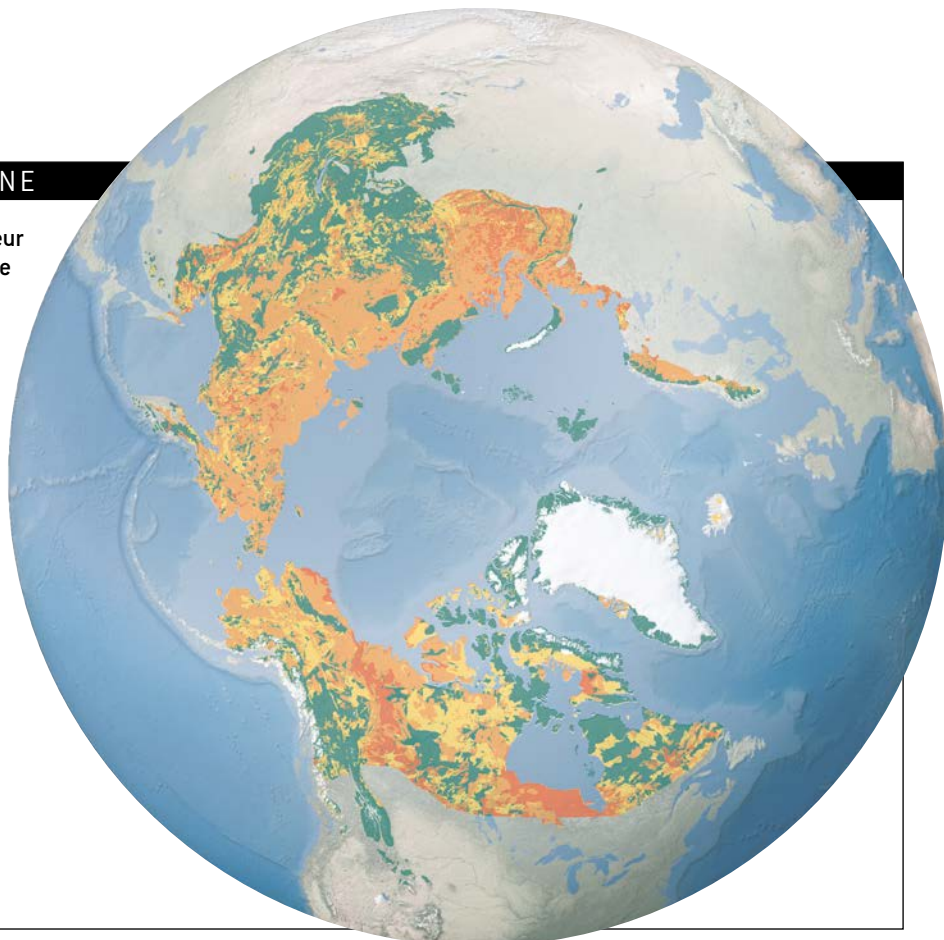
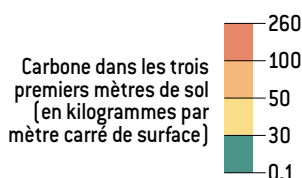
Troisièmement, quels gaz à effet de serre les microbes libéreront-ils ? En d'autres termes, quelles seront les proportions de dioxyde de carbone et de méthane, proportions dont dépendra le réchauffement dû à ces gaz ? Les sols saturés d'eau et pauvres en oxygène, voire anaérobies (sans dioxygène), telles les tourbières, produisent en effet beaucoup plus de méthane que de dioxyde de carbone. Or à masse égale et à l'échelle d'un siècle, le méthane contribue 33 fois plus à l'effet de serre que le dioxyde de carbone.

Il nous faut donc suivre de près la libération de gaz par le sol, ce que nous faisons en entourant des sites tels qu'Eight Mile Lake d'analyseurs de gaz à infrarouges. Souvent placés au sein de chambres à réflexions multiples (*caisses blanches visibles sur la photographie ci-dessus*) afin d'améliorer la précision des mesures, ces analyseurs permettent de suivre les concentrations de gaz à effet de serre dans l'air sur des secondes, des jours, des saisons ou des années.

Il s'est révélé que la toundra d'Eight Mile Lake perd plus de carbone dans l'atmosphère qu'elle n'en absorbe. Certes, le réchauffement du sol dû à l'accumulation de neige le long des barrières a stimulé la croissance des plantes. Celles-ci ont donc absorbé davantage de dioxyde de carbone dans l'air. Toutefois, ce réchauffement a aussi amené les microorganismes du sol à décomposer davantage le carbone

UN RÉSERVOIR DE CARBONE

Les trois premiers mètres d'épaisseur de la bande de sols gelés qui entoure le pôle Nord (en couleurs) contiennent environ 1 035 milliards de tonnes de carbone organique, souvent en très fortes concentrations (régions en orange foncé). Si ces pergélisols devaient dégeler, la transformation d'une partie de ce carbone en gaz à effet de serre – dioxyde de carbone et méthane essentiellement – amplifiera notablement le réchauffement climatique.



organique souterrain. Pendant la saison estivale, la croissance végétale supplémentaire compense complètement la libération additionnelle de carbone à partir du sol, mais pas pendant les longs mois d'automne et d'hiver. La vie végétative est alors stoppée, mais pas la vie microbienne. Résultat : à l'échelle de l'année, la toundra émet plus de carbone qu'elle n'en absorbe.

Afin de nous faire une idée de l'émission mondiale des pergélisols, des chercheurs du monde entier ont joint leurs efforts au sein du Réseau carbone du pergélisol (*Permafrost Carbon Network*). Nous autres chercheurs de terrain en Arctique sommes en effet comparables à des aveugles qui touchent un éléphant et qui, pour avoir une chance de pouvoir se représenter l'animal, sont obligés de combiner leurs observations. Chacun de nous détient des informations importantes et uniques, mais tant que nous ne les avons pas rassemblées, nous ne pouvons espérer acquérir une connaissance fiable de la nature et de l'ampleur du phénomène de libération du carbone enfermé dans le pergélisol.

En plus de rassembler des résultats provenant de partout sur la planète, notre réseau élabore aussi des rapports de synthèse sur

le rôle du pergélisol dans le réchauffement climatique à destination des décideurs, des médias et du grand public.

Les sols saturés d'eau émettent du méthane

L'un de nos rapports récents répond ainsi à la question des proportions de dioxyde de carbone et de méthane dans les émissions. Sous des conditions aérobies, c'est-à-dire quand le sol est sec, les microbes du sol libèrent essentiellement du dioxyde de carbone. En revanche, quand les conditions sont anaérobies, comme c'est le cas dans les marais et les tourbières, ces microorganismes libèrent aussi du méthane en plus du dioxyde de carbone. Christina Schädel, une collègue de l'université de l'Arizona du Nord et qui est aussi l'une des figures clés du Réseau carbone du pergélisol, a étudié comment les émissions de l'un et l'autre gaz se combinent, de façon à mieux apprécier l'impact sur le climat des mélanges de gaz à effet de serre émis par les sols dégelés saturés d'eau.

Christina Schädel a privilégié une approche expérimentale : elle a étudié en laboratoire le comportement de blocs de sol gelés amenés tels quels puis réchauffés

au sein d'enceintes de verre équipées d'instruments. Ces enceintes étant fermées, on peut mesurer avec précision les quantités de dioxyde de carbone et de méthane émises. En compilant les données recueillies lors de ces tests et d'autres dans le monde, elle a pu montrer que, quelles que soient les conditions de dégel – aérobies ou anaérobies –, le dioxyde de carbone prédomine. Curieusement, les sols secs, où le dioxyde de carbone est produit en conditions aérobies, contribuent deux fois plus à l'effet de serre que les sols gorgés d'eau, où ce même gaz et du méthane sont produits en conditions anaérobies.

Il s'ensuit que la fonte du pergélisol des terres élevées, bien drainées, aura vraisemblablement un impact climatique bien supérieur à celle d'une surface équivalente de sol imbibé d'eau dans la plaine. Ainsi, bien que le méthane joue aussi un rôle clé dans le bilan à établir, la répartition d'ensemble des hautes terres et des basses terres dans le paysage de l'Arctique est un paramètre clé, qui déterminera de façon significative l'impact de la fonte du pergélisol sur le climat.

En synthétisant les données de terrain et de laboratoire et en combinant ces informations avec des simulations numériques

des futurs scénarios climatiques, le Réseau carbone du pergélisol vient de fournir le résultat suivant : au cours du XXI^e siècle, entre 5 et 15 % du carbone organique du pergélisol est susceptible d'être libéré, majoritairement sous forme de dioxyde de carbone.

La valeur médiane (10 %) de cette fourchette signifierait l'entrée dans l'atmosphère de 130 milliards à 160 milliards de tonnes de carbone supplémentaires par rapport à ce qui est prévu par ailleurs. Si elle est libérée essentiellement sous forme de dioxyde de carbone à un rythme constant pendant un siècle, cette quantité serait comparable à la quantité de carbone libérée dans le monde entier jusqu'ici par la déforestation et par les autres changements d'usage des sols, mais très inférieure aux rejets dus aux combustibles fossiles.

Le dégel accélérera le changement climatique

Le dégel du pergélisol accélérera donc le changement climatique par rapport à ce que l'on prévoyait en se fondant seulement sur les émissions liées aux activités humaines. De plus, les émissions dues à ce dégel se poursuivront sans doute au-delà du XXI^e siècle, et chaque tonne additionnelle de carbone organique libérée par l'Arctique coûtera à la société.

Réduire le dégel du pergélisol par des mesures locales en Arctique n'est pas réaliste. La seule solution est de limiter la combustion des carburants fossiles et à limiter la déforestation. Cela aura pour effet de ralentir le réchauffement global, donc le dégel des terres arctiques, ce qui donnera aux sociétés humaines davantage de temps pour s'adapter.

Réduire le dégel du pergélisol par des mesures locales en Arctique n'est pas réaliste. La seule solution est de limiter la combustion des carburants fossiles et à limiter la déforestation. Cela aura pour effet de ralentir le réchauffement global, donc le dégel des terres arctiques, ce qui donnera aux sociétés humaines davantage de temps pour s'adapter.

De nouveaux projets tels que l'Expérience sur écosystème de nouvelle génération (*Next Generation Ecosystem Experiments*) du Département de l'énergie des États-Unis ou encore l'Expérience sur la vulnérabilité arctique ou boréale (*Arctic-Boreal Vulnerability Experiment*) de la Nasa

sont en cours. Ils devraient nous aider à combler nos lacunes en matière de modélisation des écosystèmes et à étendre aux autres régions environnantes les résultats obtenus dans la station expérimentale d'Eight Miles Lake.

Une question importante à éclaircir est celle de la croissance de la végétation qui accompagnera la hausse des températures dans l'Arctique. Cette croissance pourrait-elle contrebalancer la libération de carbone par le pergélisol ? Les dernières simulations suggèrent que l'allongement de la période végétative, la présence de plus de nutriments dans les sols dégelés et l'apparition d'une végétation plus touffue pourraient compenser les émissions de carbone organique par le pergélisol durant le XXI^e siècle. Mais nos mesures à Eight Miles Lake contredisent ce pronostic, puisqu'elles indiquent une émission nette de carbone dans l'atmosphère à l'échelle de l'année.

Il sera aussi essentiel de simuler la façon dont le sol arctique s'affaisse lorsqu'il dégèle. En effet, quand un sol dégèle, la glace qu'il contenait se liquéfie et s'écoule, de sorte que des pans entiers de sol s'effondrent. Ce point n'est actuellement pas pris en compte dans les simulations à grande échelle des interactions entre le carbone du pergélisol et le climat.

Nous avons par exemple observé le phénomène à Eight Miles Lake quand nous y sommes revenus au printemps de 2016 : les chemins de bois que nous avons construits il y a dix ans, nos analyseurs de gaz et nos autres appareils avaient été déformés ou déséquilibrés. Des ondulations et des crevasses avaient envahi le terrain. Nous avons aussi constaté que le dégel avait pénétré le sol plus profondément qu'avant, jusqu'à un mètre de profondeur en certains endroits. Un phénomène que nous n'avions jamais observé.

Ces observations inhabituelles s'ajoutent à nombre de phénomènes inédits dans l'Arctique : un recul record de la banquise, une fonte des neiges précoce dans tout l'hémisphère Nord et une fonte précoce de la couche de glace au Groenland. Ainsi, davantage de sols dégelés sont actuellement en train d'émettre des gaz, phénomène qui va se poursuivre de façon soutenue pendant des décennies. Nul doute qu'il compliquera le défi impressionnant auquel est déjà confrontée l'humanité : freiner le réchauffement climatique. ■



CETTE TOUR INSTRUMENTALE sert à mesurer, tout au long de l'année, les transferts de dioxyde de carbone et de méthane entre le sol et l'atmosphère. Elle permet de faire le bilan des émissions de gaz à effet de serre par l'écosystème de toundra où elle est implantée.

■ BIBLIOGRAPHIE

E. A. G. Schuur *et al.*, **Climate change and the permafrost carbon feedback**, *Nature*, vol. 520, pp. 171-179, 2015.

E. A. G. Schuur *et al.*, **Expert assessment of vulnerability of permafrost carbon to climate change**, *Climatic Change*, vol. 119(2), pp. 359-374, 2013.

E. A. G. Schuur et B. Abbott, **High risk of permafrost thaw**, *Nature*, vol. 480, pp. 32-33, 2011.

K. Walter Anthony, **Méthane : un péril fait surface**, *Pour la Science* n° 390, avril 2010.

Vers une définition quantique du kilogramme

Tim Folger



LA BALANCE DU WATT,
ici celle du NIST (l'Institut américain
des normes et des technologies),
convertit une puissance électrique en
puissance mécanique, et vice versa.
Grâce à sa grande précision, elle joue
un rôle clé dans le processus
de redéfinition du kilogramme
à partir de la constante de Planck.

L'ESSENTIEL

- Depuis 1889,
le kilogramme est défini
par un étalon matériel,
un cylindre de platine
et d'iridium conservé
à Sèvres, près de Paris.
- L'étalon a perdu de
la masse ces dernières
décennies. L'incertitude
sur sa définition
augmente et pose des
questions sur sa fiabilité.
- En 2011, la Conférence
générale des poids et
mesures a décidé de
redéfinir le kilogramme
à partir d'une constante
d'origine quantique,
la constante de Planck.
- La nouvelle définition
sera officielle en 2018.

© Richard Barnes

Plus fiable et plus précise, la nouvelle définition du kilogramme reposera, à partir de 2018, sur une constante fondamentale liée à la physique quantique.

Travailler à redéfinir le kilogramme conduit parfois à des situations étonnantes. Un après-midi d'avril 2016, à l'aéroport international de Washington, Jon Pratt se dirigeait nerveusement vers le poste de contrôle des bagages. Dans son sac, il avait rangé quatre cylindres métalliques, qui ne manqueraient pas d'attirer l'attention des agents de sécurité. Chaque cylindre pesait exactement un kilogramme. L'un d'eux, fait d'un alliage brillant de platine et d'iridium, valait au moins 40000 dollars. Les trois autres, en acier inoxydable, avaient été fabriqués avec tout autant d'attention.

Jon Pratt, qui dirige la division Mesures quantiques du NIST, l'Institut américain des normes et des technologies, avait pour mission de livrer les cylindres intacts à ses collègues dans la banlieue de Paris. Pour passer sans encombres les contrôles de l'aéroport, il était muni de documents officiels qui précisaient que les cylindres étaient quatre étalons américains du kilogramme – objets qui servent de référence pour toutes les mesures de masse dans le pays. En outre, il était précisé que ces cylindres ne devaient en aucun cas être touchés ou retirés de leur étui de protection.

Le « Grand K », l'étalon des étalons

Si quelqu'un avait posé ses doigts sur l'un des cylindres, cela aurait ruiné les mois de travail qu'avait requis la mesure de sa masse avec une précision de l'ordre de quelques milliardièmes. Jon Pratt apportait les cylindres au BIPM, le Bureau international des poids et mesures, à Sèvres, près de Paris, afin de comparer les étalons américains avec ceux de trois autres pays, ainsi qu'avec une boule de un kilogramme de silicium purifié, fabriquée par le laboratoire de métrologie allemand. Un événement historique dans le domaine de la métrologie.

Depuis 1889, le kilogramme est défini à partir d'un cylindre de platine iridié (un alliage de 90 % de platine et 10 % d'iridium, ce dernier élément servant de durcissant) conservé sous une triple cloche de verre dans un coffre-fort du BIPM. Le prototype international du kilogramme, surnommé le Grand K, sert de référence pour définir les étalons de masse de tous les pays.

Aujourd'hui, le kilogramme constitue une anomalie: c'est la dernière unité de mesure encore associée à un objet matériel... Mais plus pour très longtemps. D'ici à la fin 2018, le Grand K prendra sa retraite. Le kilogramme aura une nouvelle définition fondée sur la constante de Planck, une constante fondamentale intervenant dans les lois de la physique quantique et reliée à la quantité d'énergie que peut transporter un unique photon, la particule de lumière.

Quand le kilogramme maigrit

Mais pourquoi ne plus utiliser le Grand K? Depuis des années, les métrologues rêvent d'un étalon international de masse précis et fiable, qui soit relié à des constantes fondamentales de la nature plutôt qu'à un morceau de métal d'un autre temps. Et il y a une raison beaucoup plus pressante à vouloir trouver un successeur au Grand K: ce dernier semble perdre de la masse! Une fois tous les trente ans environ, le Grand K est extrait de son coffre pour être nettoyé et comparé à six copies officielles, les « témoins », conservés dans le même coffre. Lorsque les deux premiers témoins ont été comparés au Grand K en 1889, leur différence a été déterminée avec une grande précision. Mais, en 1946, lorsque le Grand K a été comparé à ses six témoins, la différence avait changé. Le Grand K pesait 30 microgrammes de moins que ces derniers. En 1992, la différence était passée à 50 microgrammes, l'équivalent d'une aile de mouche.

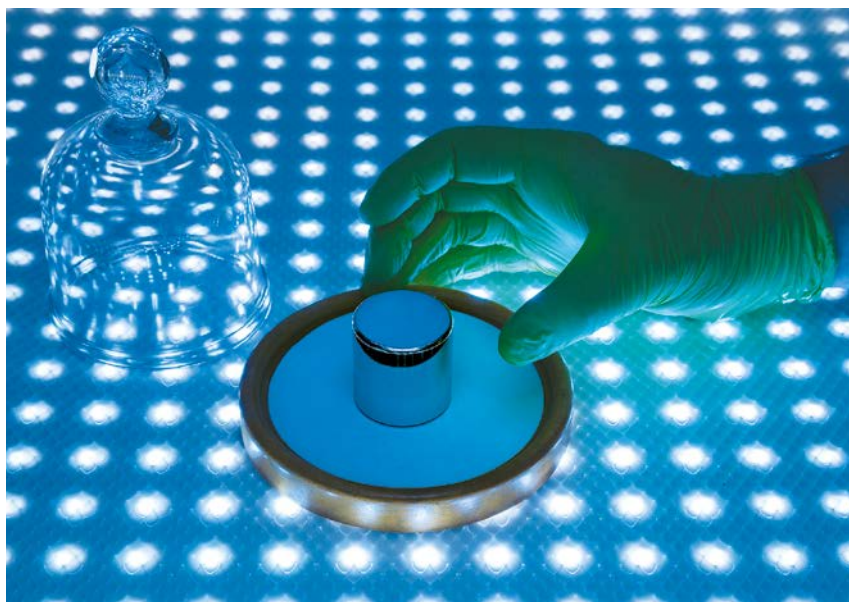
■ L'AUTEUR



Tim FOLGER est journaliste scientifique. Il contribue régulièrement aux revues

National Geographic, Discover et Scientific American.

K20, L'UN DES ÉTALONS AMÉRICAINS du kilogramme, est un cylindre de platine iridié, comme le Grand K. Il est l'un des deux prototypes attribués aux États-Unis en 1889.



© Richard Barnes

Il est peu probable que les deux témoins aient pris du poids tandis que le Grand K serait resté égal à lui-même. Pour Michael Stock, directeur du département Métrologie en physique du BIPM, il est plus probable que le prototype international du kilogramme ait perdu de la masse. Du fait de cette incertitude, les membres de la Conférence générale des poids et mesures (l'organisme décisionnel en matière de métrologie et, en particulier, des unités du système international) ont décidé en 2011 qu'une nouvelle référence de masse est nécessaire.

Personne ne sait pour quelle raison le Grand K perd de la masse. Et il reste trop précieux pour autoriser sur cet objet les tests qui pourraient apporter une réponse. Ainsi, ce problème pose la question de la fiabilité de cet étalon et donc de la définition du kilogramme.

Vers un nouvel étalon

Et les conséquences du problème du Grand K ne se limitent pas à la question de la masse. L'incertitude sur la valeur du kilogramme se propage à d'autres unités fondamentales. Ainsi, l'unité de force, le newton, est définie à partir du kilogramme, puis le newton intervient pour expliciter le joule, l'unité d'énergie, et le joule est lié au watt, l'unité de puissance, et ainsi de suite. En fin de compte, cette petite incertitude entache chaque mesure du monde physique. Par ailleurs, on se sert de certaines de ces unités pour définir la valeur des constantes fondamentales; or, comme l'explique Michael Stock, « nous en sommes au point où la valeur de certaines constantes fondamentales varie parce que le prototype international du kilogramme varie. C'est absurde. »

Le kilogramme n'est pas la seule des sept unités de base du système métrique à être repensée. Le système international (SI) des unités regroupe le kilogramme, le mètre, l'ampère (pour l'intensité d'un courant électrique), la seconde, la candela (pour mesurer l'intensité lumineuse), la mole (qui relie la masse d'un objet au nombre d'atomes qu'il contient) et le kelvin (pour la température).

Trois unités du système international ont été redéfinies ces dernières décennies. On définissait autrefois la seconde comme une fraction de la durée d'un jour; avec l'avènement des horloges atomiques, dans les années 1960, la durée correspondant à la seconde a été redéfinie en 1967 comme

étant l'inverse de la fréquence d'un rayonnement particulier émis par les atomes de césium. En 1983, le mètre, jusque-là défini comme la distance séparant deux encoches dans une barre de platine iridié conservée dans le même coffre que le Grand K, est devenu la distance parcourue par la lumière dans le vide en $1/299\,792\,458$ de seconde. Et la définition de la candela a été revue en 1979 (voir l'encadré page 66).

Créer un système d'unités universel

À l'instar du kilogramme, la mole, le kelvin et l'ampère sont programmés pour être redéfinis en 2018. L'ampère, par exemple, est dans une situation assez étrange. Sa définition officielle est si abstraite qu'elle ne peut être reproduite en laboratoire : elle implique de mesurer la force qui s'exerce entre deux fils parallèles infiniment longs, sans épaisseur et sans masse, parcourus par un courant électrique. À compter de 2018, l'ampère sera défini à partir de la charge de l'électron. Actuellement, on étudie plusieurs approches pour la mettre en œuvre. Elles font appel à divers effets quantiques et des dispositifs capables de compter des électrons un par un dans un circuit.

Des réflexions sont déjà en cours pour redéfinir la candela sur des principes quantiques ou de revoir la définition de la seconde. Mais ces améliorations ne sont pas prévues avant au moins une quinzaine d'années.

La redéfinition du kilogramme est de loin la plus urgente. Elle s'inscrit au cœur d'un effort visant à créer un système d'unités réellement universel, qui ne serait pas lié à des conventions arbitraires et anthropocentrées. En principe, les nouvelles unités devraient avoir du sens pour des êtres intelligents vivant sur d'autres planètes. Pour les métrologues, c'est un moment unique dans l'histoire des unités.

Cette idée d'universalité remonte à la Révolution française, quand le système métrique est né. Auparavant, partout en France, des règles locales définissaient les poids et les longueurs. Les normes variaient d'une ville à l'autre, et pas moins de 700 unités de mesure étaient en vigueur dans le pays. Une toise, par exemple, était l'équivalent du *fathom* anglais : la distance entre les deux bras écartés. Mais la toise parisienne n'était pas forcément identique à la toise utilisée à Marseille. Les savants de l'époque ont donc voulu mettre fin à

ce chaos en créant un nouveau système qui soit universel, « à tous les temps, à tous les peuples ». C'est dans ce contexte qu'est né le premier kilogramme étalon, le prédécesseur du Grand K.

Richard Davis a dirigé l'ancien département de recherche sur la masse au BIPM, et assistait le directeur du bureau dans ses responsabilités de maintenance du Grand K. Il explique qu'« en 1791, l'idée était que les étalons devaient reposer sur des phénomènes naturels et immuables. Nous travaillons aujourd'hui à partir de cette même idée. » La différence est que les métrologues d'aujourd'hui se fondent sur des constantes naturelles réellement invariables.

Après la Révolution française, l'histoire des étalons du kilogramme s'est déroulée au pavillon de Breteuil, à Sèvres, qui héberge le BIPM depuis 1875, lorsque le traité de la Convention du mètre a été signé par dix-sept nations. Pendant la Seconde Guerre mondiale, des bombardements ont fait trembler le pavillon. D'après la Convention, l'étalon ne peut quitter ce lieu. Il a alors été décidé de placer le Grand K dans un coffre antichoc spécial. Les témoins, eux, ont été mis à l'abri dans un coffre au sous-sol de la Banque de France.

Il est nécessaire de nettoyer de temps en temps le Grand K et de le comparer aux témoins. Cette opération est loin d'être anodine ; elle n'a d'ailleurs été réalisée que quatre fois depuis 1889. D'abord, on doit extraire le Grand K du caveau où est entreposé le coffre-fort. Le caveau est fermé grâce à trois verrous différents dont les clés sont réparties entre le directeur du BIPM, le directeur des Archives nationales de Paris et le président du Comité international des poids et mesures (CIPM), qui supervise le travail du BIPM. Ainsi, les trois représentants doivent être présents pour accéder au coffre-fort, lequel est protégé à son tour par un code. À l'intérieur, le Grand K est isolé sous une triple cloche. Le coffre contient aussi les six témoins.

Les trois porteurs des clés se réunissent une fois l'an pour ouvrir le caveau et vérifier que le Grand K est toujours là, mais

En 2018,
quand le kilogramme
sera défini à partir de
la constante de Planck,
le Grand K
deviendra une curiosité
historique

CHANGER LES UNITÉS DE MESURE

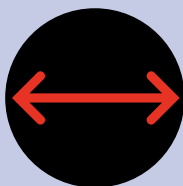
Le Système international (SI) est adopté officiellement par la plupart des pays du monde (les trois exceptions étant la Birmanie, le Liberia et les États-Unis). Il est fondé sur sept unités de mesure, à partir desquelles on définit 22 autres unités (telles que le newton, le joule, le tesla, le volt, le pascal, etc.). En 2018, le Comité international des poids et mesures redéfinira quatre de ces unités de base. Les valeurs de quatre constantes de la nature (la constante de Planck h , la charge électrique élémentaire e , la constante de Boltzmann k_B et le nombre d'Avogadro N_A) seront fixées précisément afin de donner une nouvelle définition au kilogramme, à l'ampère, au kelvin et à la mole. Le mètre, la seconde et la candela ne changent pas de définition, au moins dans un futur proche.

Les unités qui ne changent pas de définition

Unité : **Mètre (m)**
Mesure de la longueur

Définition actuelle (1983)

En 1983, la Conférence générale des poids et mesures a défini la vitesse de la lumière dans le vide comme étant égale à 299 792 458 mètres par seconde. Le mètre est donc la distance parcourue par la lumière dans le vide en $1/299\,792\,458$ de seconde.



Note historique

Lorsque l'Académie des sciences française a proposé le système métrique en 1791, le mètre a été défini comme $1/10\,000\,000$ de la moitié du méridien reliant le pôle Nord au pôle Sud en passant par Paris.



Unité : **Seconde (s)**
Mesure du temps

Définition actuelle (1967)

La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133.

Note historique

La définition originale de la seconde est $1/86\,400$ de jour solaire terrestre moyen.

Unité : **Candela (cd)**
Mesure de l'intensité lumineuse

Définition actuelle (1979)

La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique à une longueur d'onde de 555 nanomètres et dont l'intensité énergétique dans cette direction est de $1/683$ de watt par stéradian. En pratique, dans le cas d'une source émettant plusieurs fréquences, on utilise des fonctions de pondération décrivant la sensibilité spectrale relative de l'œil humain.

Note historique

Au début du XX^e siècle, la candela était définie à partir de l'intensité lumineuse d'une lampe à filament de carbone. En 1933, la définition a été améliorée en se référant au rayonnement du corps noir.



il est hors de question d'y toucher. Finalement, peu de membres du BIPM ont vu le Grand K, et même les photos officielles sont celles d'un fac-similé. « Je l'ai vu une fois », nous raconte Susanne Picard, qui travaille au pavillon de Breteuil depuis 1987.

Pour le nettoyage, on suit scrupuleusement un protocole. Un technicien saisit le cylindre brillant avec une pince recouverte de peau de chamois et le transporte jusqu'au site de nettoyage. On le frotte alors avec une peau de chamois imbibée d'alcool et d'éther, puis on le rince deux fois avec de l'eau distillée. Un jet d'azote gazeux permet de le sécher. L'opération dure environ une heure.

Le BIPM a expérimenté différentes techniques de nettoyage sur des masses tests – en utilisant des rayonnements ultraviolets par exemple –, mais ces méthodes

rendaient les objets trop propres. Michael Stock explique qu'en effet, « ces techniques décapent trop bien la surface du cylindre ; elles enlèvent plus de saletés que la méthode traditionnelle, la surface devient alors très instable car beaucoup trop réactive. » Le Grand K deviendrait alors beaucoup moins fiable. Dès lors, le Bureau en reste à la méthode habituelle.

Après le nettoyage, l'équipe apporte le Grand K et les témoins dans une salle blanche où se trouve le comparateur de masses, un instrument d'une valeur de près de 500 000 euros capable de détecter des différences de masse de l'ordre du microgramme. Au quotidien, le département des masses du BIPM utilise le comparateur de masses et dix étalons de référence pour effectuer diverses opérations de calibrage.

On ne sort le Grand K et ses témoins que toutes les quelques décennies pour vérifier les étalons nationaux.

Une mesure difficile

Quand la nouvelle définition du kilogramme sera fondée sur la constante de Planck, le Grand K ne sera plus qu'une curiosité historique. Cette constante est notée h et est égale à environ $6,626 \times 10^{-34}$ joule·seconde. Son unité combine l'énergie et le temps, mais on peut la relier à la masse en utilisant la relation d'Einstein $E = mc^2$, où c est la vitesse de la lumière dans le vide. Comme G , la constante newtonienne de la gravitation, la constante de Planck apparaît dans la théorie, mais sa valeur ne peut être déterminée que par l'expérience.

Les unités à redéfinir

Unité : **Kilogramme (kg)**
Mesure de la masse

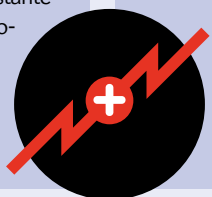
Définition actuelle (1889)

Le kilogramme est défini à partir du Grand K, un cylindre de platine iridié conservé au BIPM, à Sèvres.



Redéfinition proposée

Programmée pour 2018, la redéfinition du kilogramme le liera à la constante de Planck, qui est issue de la théorie quantique et qui précise, par exemple, la quantité d'énergie que porte un photon, la particule de lumière. En fixant la valeur numérique de la constante de Planck, les métrologues définiront le kilogramme.



Unité : **Ampère (A)**
Mesure du courant électrique

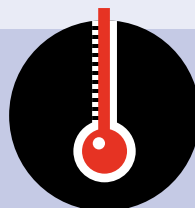
Définition actuelle (1946)

Un ampère est l'intensité d'un courant constant qui, s'il est maintenu dans deux conducteurs linéaires et parallèles, de longueurs infinies, de sections négligeables, et distants de 1 mètre dans le vide, produit entre ces deux conducteurs une force linéaire égale à 2×10^{-7} newton par mètre. En pratique, cette définition n'est pas reproductible de façon exacte en laboratoire.

Redéfinition proposée

En fixant la valeur numérique de la charge élémentaire e (environ $1,6 \times 10^{-19}$ ampère·seconde, ou coulomb), l'ampère sera redéfini comme un flux de charges élémentaires par seconde. On pourra aussi redéfinir les unités de tension et de résistance via

les constantes de Josephson et de von Klitzing, qui dépendent de e et de la constante de Planck.



Unité : **Kelvin (K)**
Mesure de la température

Définition actuelle (1967)

Le kelvin est égal à $1/273,16$ de la température thermodynamique du point triple de l'eau (où coexistent les phases solide, liquide et gazeuse). En pratique, cette définition crée des incertitudes importantes pour des températures basses (inférieures à 20 kelvins) ou élevées (supérieures à 1300 kelvins).

Redéfinition proposée

Le kelvin sera défini en fixant la valeur de la constante de Boltzmann, égale à environ $1,380 65 \times 10^{-23}$ joule par kelvin. La constante de Boltzmann relie l'énergie cinétique moyenne des molécules d'un gaz à la température du gaz.

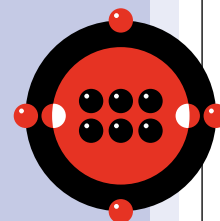
Unité : **Mole (mol)**
Mesure de la quantité d'une substance donnée

Définition actuelle (1971)

La mole est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires (atomes, molécules, etc.) qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogramme de carbone 12. Ce nombre, égal à environ $6,022 14 \times 10^{23}$, définit le nombre d'Avogadro, qui dépend donc de la définition du kilogramme.

Redéfinition proposée

La mole sera définie en fixant la valeur du nombre d'Avogadro.



Pour effectuer la transition du kilogramme d'un étalon matériel à un étalon immatériel et quantique, le BIPM a défini une stratégie en deux étapes. Dans un premier temps, les laboratoires nationaux de métrologie de cinq pays ont utilisé la même valeur de la constante de Planck pour tester la cohérence du futur système métrologique. Ils ont pesé leurs étalons nationaux en fonction de cette valeur et les ont envoyés au BIPM pour comparer leurs résultats.

C'est précisément ce qui a été réalisé l'été dernier lorsque Jon Pratt a apporté les étalons américains au BIPM. Les résultats seront annoncés au cours de cette année 2017. S'ils sont satisfaisants, les équipes inverseront le processus et utiliseront chacune leur étalon national pour ajuster le plus

précisément leurs mesures de la constante de Planck. On fixera alors définitivement la valeur de cette dernière, et l'on définira le kilogramme à partir de cette valeur choisie.

Pour relier la constante de Planck à la masse, les métrologues utilisent deux approches très différentes et complémentaires, une boule de silicium (*voir l'entretien avec Richard Davis, pages 70 et 71*) et un dispositif complexe, nommé balance du watt (aussi nommée balance de Kibble en hommage à son inventeur, le physicien anglais Bryan Kibble, décédé en 2016). Les expériences utilisant les balances du watt sont si ardues qu'en 2012 la revue britannique *Nature* les a classées parmi les cinq projets les plus difficiles en physique, avec la recherche du boson de Higgs et celle des ondes gravitationnelles.

En mai dernier, j'ai accompagné Stephan Schlamminger, métrologue au NIST, sur le site hébergeant la plus ancienne des deux balances du watt du NIST. La plupart des mesures de la constante de Planck ont été effectuées sur cet appareil. La nouvelle balance, achevée en 2014, fonctionne globalement de la même façon.

Si l'extérieur du bâtiment fait penser à une ferme, l'intérieur vous plonge dans un autre monde, à l'image des romans de Jules Verne. Les murs sont protégés avec des plaques de cuivre jusqu'au deuxième étage et tout l'équipement est en laiton. Stephan Schlamminger explique que le fer est proscrit, et que le cuivre et le laiton protègent les instruments des champs magnétiques extérieurs. Mais à l'intérieur, le champ magnétique produit est assez puissant

La balance du watt permet de relier la masse à la constante de Planck. En partant d'un étalon de un kilogramme, les métrologues fixeront définitivement la valeur de la constante de Planck. Dès lors, la balance pourra être utilisée pour mesurer n'importe quelle masse, indépendamment d'un étalon matériel qui pourrait s'altérer au cours du temps.

Ce dispositif, complexe, ressemble à une balance à deux plateaux. Sous l'un des plateaux (celui de gauche, ci-dessous) est suspendue une bobine horizontale constituée d'un fil conducteur de longueur L enroulé sur lui-même. Un système externe crée un champ magnétique B radial et horizontal où est plongée la bobine. La balance fonctionne selon deux modes complémentaires qui doivent être réalisés pour convertir la masse en constante de Planck et inversement.

En mode statique, on pose sur le plateau de gauche un étalon de un kilogramme; cette masse est notée m . Pour compenser le poids mg de l'étalon (où g est l'accélération de pesanteur locale), on ajuste le courant i qui parcourt la bobine et qui crée sur celle-ci une force de Laplace verticale, d'amplitude iBL . À l'équilibre, on obtient la relation $mg = iBL$. Un interféromètre laser permet de s'assurer qu'on a atteint la position d'équilibre.

En mode dynamique, on retire l'étalon. On déplace la bobine verticalement à vitesse constante v , toujours dans le champ magnétique B . Une tension apparaît aux bornes de la bobine, de la forme $U = vBL$. L'interféromètre laser assure que la vitesse est bien constante.

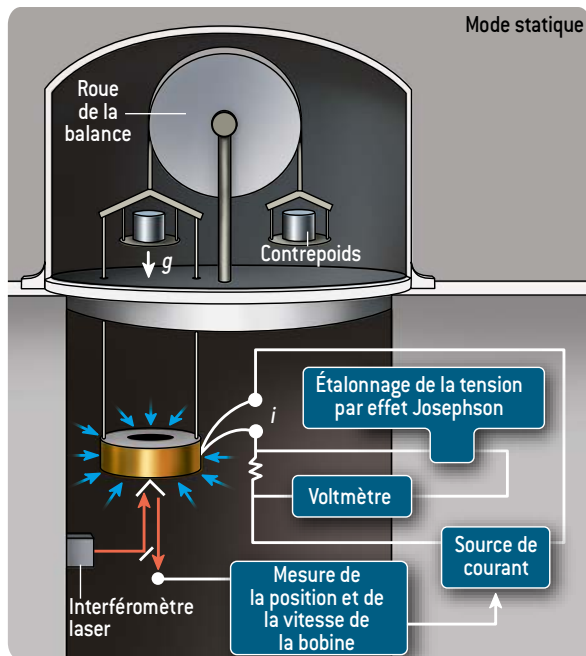
En combinant les mesures des deux modes, on élimine le produit BL , qu'il est difficile de mesurer avec précision. On obtient $mgv = Ui$. Chaque membre de cette égalité a la dimension d'une puissance (puissance mécanique, à gauche, et puissance électrique, à droite), d'où le nom de balance du watt (l'unité de la puissance). Pour relier la masse m à la constante de Planck h , on fait appel à deux phénomènes quantiques, l'effet Josephson et l'effet Hall quantique.

L'effet Josephson se traduit par la circulation d'un courant électrique entre deux matériaux supraconducteurs séparés par une couche mince isolante. Dans les

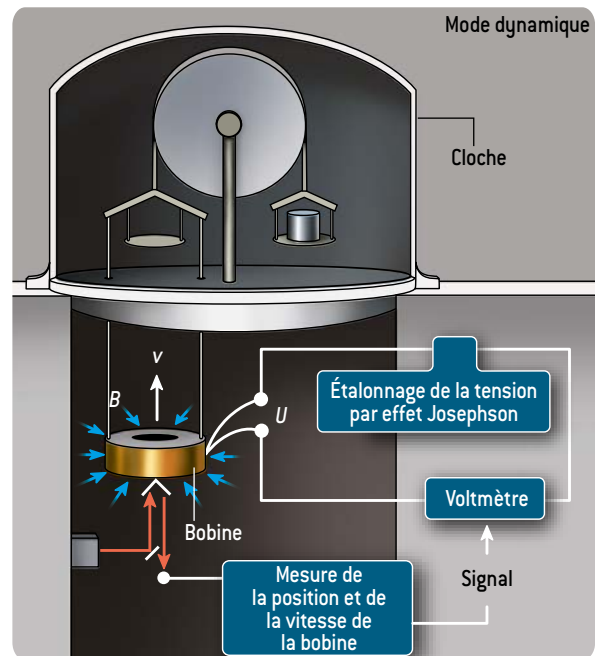
matériaux supraconducteurs, les électrons s'associent par paires, les paires de Cooper, et circulent sans résistance. Ces paires n'existent pas dans les isolants, mais elles passent ici d'un supraconducteur à l'autre par effet tunnel. En irradiant la jonction à une fréquence donnée f , la tension à travers la jonction dépend du courant des paires. On voit un « escalier » des tensions en fonction du courant appliqué, dont la différence entre deux marches successives est fh/e , où e est la charge de l'électron. Ce dispositif permet de déterminer la tension du mode dynamique de la balance du watt.

L'effet Hall classique correspond à la formation d'une tension perpendiculaire à la circulation d'un courant traversant un matériau baigné dans un champ magnétique. On définit une résistance Hall associée. Dans un semi-conducteur bidimensionnel et à basse température, cette résistance ne prend que certaines valeurs discrètes, qui dépendent de la constante de von Klitzing h/e^2 . Le courant du mode statique de la balance est déterminé en combinant l'effet Hall quantique et l'effet Josephson.

En fin de compte, la masse m est proportionnelle à la constante de Planck h .



LA BALANCE DU WATT permet des mesures de précision dont le résultat peut être faussé par de nombreux facteurs. Il est notamment crucial de limiter les vibrations du système. En outre, le dispositif est placé sous une cloche au sein duquel règne un vide poussé, afin



d'éviter des phénomènes tels que les mouvements de convection de l'air. Le champ magnétique externe peut exercer une force sur la masse test; il faut donc isoler celle-ci de ce champ créé par l'aimant supraconducteur, alors même que ce champ est intense.

pour effacer les cartes bancaires. Au centre de la pièce, au premier étage, se tient une colonne comportant à sa base un aimant supraconducteur – refroidi avec de l'hélium liquide lorsqu'il est en fonctionnement.

La balance est au deuxième étage. Elle est composée d'une roue d'aluminium large de 50 centimètres montée verticalement avec des plateaux de balance suspendus à des fils de chaque côté (*voir l'encadré page ci-contre*). Un plateau supporte une masse test. Sous ce plateau est suspendue une bobine, un enroulement de fil conducteur, plongée dans le champ magnétique de l'aimant supraconducteur du premier étage. Le plateau de l'autre côté contient un contrepoids et un moteur électrique.

La balance fonctionne selon deux modes complémentaires, nécessaires pour calculer la constante de Planck à partir de la masse.

Le mode statique consiste à équilibrer le poids de la masse test grâce à la force dite de Laplace qu'exerce le champ magnétique sur la bobine parcourue par un courant électrique, sous le plateau.

Dans le mode dynamique, on retire la masse test du plateau. On déplace la bobine à vitesse constante dans le champ magnétique, grâce au moteur situé sous l'autre plateau. Une tension apparaît entre les deux extrémités du fil de la bobine.

L'intensité du courant nécessaire pour équilibrer la balance en mode statique et la tension obtenue en mode dynamique permettent, *via* des formules décrivant les phénomènes quantiques mis en œuvre dans la mesure de ces deux grandeurs, de remonter à la constante de Planck. Ainsi, en partant d'une masse égale à exactement un kilogramme, la balance du watt permet de déterminer la constante de Planck. À l'inverse, une fois la valeur de la constante de Planck fixée, on peut se servir de la balance pour mesurer n'importe quelle masse sans que cela nécessite un étalon de masse matériel.

Pour réaliser des mesures précises, Stephan Schlamminger et ses collègues doivent tenir compte des fluctuations locales de la pression de l'air et de l'accélération de pesanteur. La précession de la Terre et les marées doivent aussi être considérées. « Si nous n'effectuons pas les corrections liées aux marées », explique le métrologue, « l'erreur serait alors de 100 pour 1 milliard. »

Malgré la complexité de la machine, le chercheur a souvent l'impression d'utiliser un dispositif d'un autre temps : quand son équipement mesurait la constante de Planck, il

fallait ouvrir ou fermer des soupapes dans un ordre précis, et surveiller constamment la pression dans les réservoirs d'hélium. « Nous étions comme aux manettes d'une locomotive, ajoute le chercheur, et pourtant nous étions en train d'évaluer des quantités relevant de la mécanique quantique. »

La mutation quantique du kilogramme

La suite des opérations va dépendre des résultats des mesures effectuées en 2016, lorsque les différents étalons nationaux auront été comparés. Au moins trois des cinq étalons participants doivent avoir une valeur de masse chez eux qui est cohérente avec la masse étalonnée par rapport au Grand K, à moins de 50 microgrammes près, suivant les exigences du BIPM. Une fois les résultats publiés, l'opération de redéfinition débutera vraiment.

Si tout va bien, le kilogramme sera alors redéfini à partir de la constante de Planck. Le BIPM a fixé des contraintes sévères sur cette redéfinition : toutes les mesures de la constante de Planck effectuées par les participants doivent être affectées d'une incertitude inférieure à 50 pour 1 milliard et au moins un dispositif doit avoir une précision meilleure que 20 pour 1 milliard, valeur que l'équipe canadienne a déjà atteinte. Et pour que la définition soit effective en 2018, toutes les mesures de la constante de Planck doivent être acceptées pour publication au 1^{er} juillet 2017.

Et le Grand K ? Il restera dans son coffre-fort. Au vu de la complexité des balances du watt, les étalons matériels du kilogramme ne sont pas près de disparaître. Plutôt que d'utiliser les balances du watt, les laboratoires de métrologie continueront d'utiliser des étalons dans leur travail quotidien. Mais ces étalons seront calibrés à partir de balances du watt et non du Grand K.

Est-ce la fin de l'histoire ? Avons-nous maintenant la définition universelle du kilogramme « à tous les temps, à tous les peuples » dont rêvaient les savants de la Révolution ? Michael Stock réserve son jugement. « L'un de mes prédécesseurs, lauréat du prix Nobel, Charles Édouard Guillaume, pensait que l'étalon actuel perdurerait 10 000 ans. Cet excès d'optimisme m'amène à être prudent. Je ne sais pas s'il s'agit là de l'ultime redéfinition du kilogramme. Elle sera acceptable pour un temps, mais peut-être pas pour 10 000 ans. » ■

■ BIBLIOGRAPHIE

M. Thomas, *Détermination de la constante de Planck au moyen d'une balance du watt*, thèse de doctorat, CNAM, 2015.

F. L. S. Chao *et al.*, *A LEGO Watt balance : An apparatus to determine a mass based on the new SI*, *American Journal of Physics*, vol. 83(11), pp. 913-922, 2015.

M. Stock, *Watt balance experiments for the determination of the Planck constant and the redefinition of the kilogram*, *Metrologia*, vol. 50(1), 2013.

I. Robinson, *Redéfinir le kilogramme*, *Pour la Science*, n° 353, mars 2007.

« Le nouveau kilogramme sera plus pratique »

À partir de 2018, le kilogramme sera défini à partir de la constante de Planck et non d'un cylindre de platine conservé dans un coffre-fort près de Paris. Richard Davis nous explique pourquoi cette nouvelle définition sera plus fiable et, surtout, plus pratique d'utilisation.



Richard DAVIS est ancien directeur du département responsable de la masse au BIPM (Bureau international des poids et mesures), à Sèvres, près de Paris.

POUR LA SCIENCE

Quels sont les inconvénients du Grand K, le prototype étalon du kilogramme ?

RICHARD DAVIS: Le Grand K est utilisé depuis 1889 comme référence. Il s'agit d'un cylindre de platine iridié conservé sous vide sous une triple cloche pour le protéger de la poussière. Pour s'assurer que sa masse ne varie pas, elle est comparée à celle de six « témoins », des cylindres identiques au Grand K, conservés dans le même coffre-fort.

Depuis 1889, la masse des témoins a augmenté de 50 microgrammes par rapport à celle du Grand K. Comme cette différence est relative, il est difficile de conclure si le Grand K a perdu de la masse, si les témoins en ont gagné, ou, pire, si tous les cylindres ont pris du poids et que nous ne mesurons ici qu'un détail de cette évolution.

Diverses hypothèses ont été avancées pour expliquer cette déviation. Par exemple, si un gaz prisonnier du platine du Grand K s'en échappe au fur et à mesure, celui-ci perdrait de la masse. Mais un tel gaz n'a pas été décelé. Nous n'avons pas d'explication satisfaisante pour l'instant.

Du fait du manque de fiabilité de l'étalon, les métrologues ont décidé de changer de référence.

PLS

La nouvelle définition se veut donc plus fiable, plus précise et plus pratique ?

R. D. : Absolument. La nouvelle définition repose sur la constante de Planck, qui apparaît dans la théorie quantique. Cette constante h est reliée notamment à l'énergie d'un photon: $E=hf$, où f est la fréquence lumineuse. Et comme on peut aussi convertir la masse en énergie grâce à la formule d'Einstein $E=mc^2$, il est assez naturel de relier le kilogramme à la constante de Planck.

Le comité chargé de redéfinir les unités a la volonté de faire des choix pratiques pour les métrologues. Pour le kilogramme, nous ne serons plus tributaires d'un objet unique, le Grand K, d'autant peu accessible qu'il est rarement extrait de son coffre. Tout laboratoire équipé des bons instruments pourra étalonner une masse de façon fiable et précise à partir de la constante de Planck.

PLS

Concrètement, comment la nouvelle définition du kilogramme sera-t-elle mise en œuvre ?

R. D. : La future définition du kilogramme n'impose pas la méthode utilisée pour convertir la constante de Planck en une

masse. Contrairement au cas de la seconde, par exemple, définie à partir de la fréquence d'une radiation du césium 133 – alors que ce n'est peut-être plus aujourd'hui le moyen le plus précis pour mesurer le temps. En ce qui concerne la constante de Planck et le kilogramme, un des deux moyens les plus précis actuellement est la balance du watt. Celle-ci ressemble à une balance classique, mais on y compare la force de pesanteur à une force électromagnétique, du type force de Laplace, la mesure de cette dernière étant reliée à la constante de Planck.

Dans le processus de redéfinition du kilogramme, on utilise aujourd'hui les balances du watt pour mesurer la constante de Planck avec une bonne précision, afin d'en fixer ultérieurement la valeur une fois pour toutes. Ces expériences sont délicates, car beaucoup d'effets peuvent perturber les mesures.

Il existe deux balances très performantes en fonctionnement, celle du NIST, l'Institut américain des normes et technologies, et une autre au Canada, qui est pour l'instant la plus précise. D'autres sont en cours de développement: une au BIPM, une au Laboratoire national de métrologie et d'essais, à Trappes, une en Suisse et une en Corée. En Chine, les chercheurs développent une balance du joule, au principe équivalent.

PLS

Existe-t-il une autre méthode pour mesurer la constante de Planck ?

R.D. : Une approche complémentaire consiste à relier le kilogramme à la constante de Planck en passant par la masse d'un atome de silicium. L'idée est d'utiliser une boule parfaitement sphérique de silicium sans aspérités et dont la structure cristalline doit être sans défauts ni impuretés. Connaissant le volume occupé par un atome dans le réseau cristallin et le volume de la sphère, on peut évaluer le nombre N d'atomes de silicium dans la sphère, qui est identique au rapport de la masse m de la sphère à la masse d'un seul atome de silicium. Il faut ensuite relier la masse d'un atome de silicium avec la constante de Planck. Ce lien ne dépend pas du Grand K et les physiciens l'ont mesuré (avec des techniques d'interférométrie atomique par exemple) avec une grande précision, meilleure que celle demandée pour la redéfinition du kilogramme.

PLS

Où en sommes-nous dans le processus de redéfinition du kilogramme ?

R.D. : Nous suivons une feuille de route avec un calendrier précis. Les laboratoires mesurent actuellement la constante de Planck. Certaines contraintes ont été fixées : trois expériences (balance du watt ou sphère de silicium) doivent avoir une incertitude inférieure à 50 pour 1 milliard, dont une avec une précision meilleure que 20 pour 1 milliard, ce qui est le cas pour la balance canadienne et pour la sphère de silicium. Ces résultats doivent être acceptés pour publication d'ici au 1^{er} juillet 2017. Si tout se passe bien, la Conférence générale des poids et mesures se réunira pour adopter une nouvelle définition du kilogramme à l'automne 2018.

PLS

Quel impact sur les laboratoires de métrologie cette redéfinition du kilogramme aura-t-elle ?

R.D. : Après la Conférence générale, il faudra mettre en place cette nouvelle défini-



LE GRAND K, cylindre en platine iridié dont on voit ici un fac-similé protégé sous une triple cloche de verre, a été la référence internationale du kilogramme pendant près de 130 ans. La nouvelle définition du kilogramme, prévue pour 2018, s'appuiera sur une constante universelle, la constante de Planck, et non sur un étalon matériel.

tion dans les laboratoires, ce qui prendra plusieurs mois. Le BIPM jouera un rôle important de coordination à ce stade.

Les balances du watt ne seront pas utilisées au quotidien, au moins dans un premier temps. Elles sont trop complexes à faire fonctionner. Elles seront donc utilisées, à l'instar du Grand K, de temps en temps pour étalonner un prototype de référence. Ces étalons matériels sont pratiques et ont fait leurs preuves en usage quotidien.

Bien sûr, on peut aussi imaginer que le directeur d'un laboratoire de métrologie voudra utiliser sa balance du watt plus régulièrement pour faire des étalonnages. Le développement des balances du watt ne s'arrêtera donc pas avec la mesure de la constante de Planck. En outre, d'autres laboratoires voudront peut-être construire leur propre balance du watt. Ici encore, le BIPM continuera de jouer un rôle de coordination en s'assurant que ceux qui souhaitent étalonner le kilogramme puissent le faire avec une précision suffisante.

Finalement, cela va peu changer le quotidien des métrologues, mais ils travailleront à partir d'une définition plus fiable et pratique du kilogramme. Le seul

domaine qui pourrait connaître un changement est celui des électroniciens, qui utilisent des unités fondées sur une valeur conventionnelle de la constante de Planck. Lorsque la valeur de cette constante sera fixée une fois pour toutes, celles utilisées par les électroniciens seront modifiées, mais de façon infime. Et une fois la transition opérée, il n'y aura pas besoin d'y revenir.

PLS

Les étalons matériels resteront utiles. Qu'en est-il du Grand K ?

R.D. : Le Grand K ne va pas non plus disparaître avec la nouvelle définition du kilogramme. La Convention du mètre, signée en 1875 et toujours en vigueur, impose la conservation du prototype international au BIPM dans les conditions préconisées. De même, nous avons toujours la barre de platine qui définissait le mètre à l'époque.

En outre, le Grand K sera probablement confronté à une balance du watt pour enfin savoir si sa masse était stable ou si elle avait au contraire varié. ■

Propos recueillis par Sean Bailly

La saga du premier câble transatlantique

Ainissa Ramirez

Il y a 160 ans débutait une épopée qui n'avait rien à envier à celle du rail : la pose d'un câble télégraphique sous-marin reliant l'Amérique à l'Europe.

Mardi 4 août 1857. La flotte du télégraphe, constituée de huit navires – quatre américains et quatre anglais – quitte le port de Queenstown, près de Cork en Irlande, en direction de Valentia, une petite île au large de la côte ouest irlandaise. Deux des bateaux, le USS *Niagara*, de la New York Navy Yard, et le HMS *Agamemnon*, de la Royal Navy britannique, ont une cargaison un peu particulière. Chacun porte la moitié d'un câble télégraphique destiné à relier l'île et Terre-Neuve, au Canada, à travers l'océan Atlantique. Mis au point dans les années 1830, le télégraphe électrique a fait ses preuves sur de longues distances terrestres, et un câble télégraphique sous-marin a déjà été installé, en 1851, entre Douvres et Calais. Toutefois, l'ambition est ici d'un tout autre ordre : la longueur totale du câble est d'environ 4 000 kilomètres.

L'expédition commence le 7 août. Les deux navires font tous deux route vers l'ouest. Le *Niagara* dépose peu à peu son câble sur le fond marin. À la fin de la pose, il est prévu de connecter le câble à celui du second navire, qui prendra le relais. Tout va bien jusqu'au soir du 10 août, où se produit un accident sur la machine de pose du câble. Celui-ci se bloque et, sous l'effet de la tension, due notamment à une forte houle, casse brutalement. Plus de 500 kilomètres de câble sont perdus.

La pose complète d'un câble transatlantique n'a eu lieu qu'un an plus tard, durant l'été 1858. Ce fut le premier pas d'une technologie qui a non seulement révolutionné les

L'ESSENTIEL

- En 1854, Cyrus West Field, un riche industriel américain, se prit de passion pour une idée : installer le télégraphe entre l'Irlande et Terre-Neuve.
- Une première expédition échoua en 1857. Mais un an plus tard, avec une troisième tentative, un câble long d'environ 4 000 kilomètres relia enfin les deux côtés de l'Atlantique.
- La victoire fut courte : il ne fonctionna que pendant quatre semaines. Une liaison télégraphique durable ne fut établie qu'en 1866.



communications, mais aussi influencé les affaires, la politique et même le langage.

Tout a commencé par une rencontre, un soir d'hiver 1854. Cyrus West Field est un homme passionné qui ne sait entrer dans une pièce que brusquement, alors qu'il mène une vie plutôt oisive. Âgé de 34 ans, il a déjà fait fortune dans l'industrie du papier et, sans projet pour l'avenir, se retrouve précocement à la retraite. Il sait ce que travailler dur signifie : huitième enfant d'un pasteur, il a quitté en 1835, à 16 ans, son foyer de Stockbridge, dans le Massachusetts, pour s'installer à New York avec pour seuls bagages 25 dollars et la bénédiction de son père. Il a commencé comme magasinier, tenant le compte de

ses moindres dépenses. Cette discipline lui a permis de progresser avec régularité vers la réussite. Il a aussi connu la solitude : régulièrement, il a envoyé des lettres chez lui, implorant une réponse. Autant de traits qui ont pu le rendre réceptif à cette fameuse rencontre de janvier 1854.

Les malheurs de Gisborne

Un visiteur inconnu se présente à l'hôtel particulier de Field, dans le quartier de Gramercy Park. Son frère, Matthew Field, a invité un dénommé Frederick Gisborne, un homme qui a joué de malchance. Gisborne est un ingénieur britannique qui vit à Terre-Neuve. Fasciné par le télégraphe,

il rêve d'installer un réseau de fils sur l'île et de la relier au continent, jusqu'à New York. Située à l'extrême est de l'Amérique du Nord, Terre-Neuve n'est qu'à 3200 kilomètres de l'Europe. Un navire européen qui traverse l'Atlantique pour apporter des nouvelles en Amérique gagnerait un jour s'il lui suffisait de les livrer sur l'île.

L'idée est bonne, mais Gisborne a sous-estimé les difficultés. Terre-Neuve est une contrée sauvage et hostile. La simple inspection de 600 kilomètres a demandé plusieurs mois à l'ingénieur, et a révélé qu'il était quasi impossible d'y installer des fils télégraphiques. Ses commanditaires se sont retirés, le laissant dans l'incapacité de payer ses dettes. Gisborne a ainsi tout perdu et



LE 23 JUILLET 1865, pour la quatrième fois, une expédition partit de la petite île de Valentia, en Irlande, en direction de l'Amérique, avec pour mission de dérouler tout du long un câble télégraphique. Un énorme paquebot, le *Great Eastern*, transportait le câble, entouré d'une escorte de navires qui paraissaient minuscules à ses côtés.

Illustration de Robert Dudley dans W. H. Russell, *The Atlantic Telegraph*, 1865 © Bill Burns, www.atlantic-cable.com.

a été mis en prison. Mais à sa libération, il s'est rendu à New York pour y trouver de nouveaux bailleurs de fonds. C'est une rencontre fortuite avec Matthew Field qui l'a alors mené à Cyrus.

Gisborne, un barbu costaud aux mains rugueuses, s'assied en face d'un Field grand et mince, à l'air fragile. Intrigué, mais pas convaincu, Field écoute la proposition de Gisborne : gagner un jour sur l'arrivée d'un message. Après avoir examiné un globe terrestre dans sa bibliothèque, Field s'aperçoit que la longueur nécessaire pour connecter Terre-Neuve au continent américain est proche de la distance entre l'île et l'Europe. Il lui apparaît alors beaucoup plus intéressant de gagner la totalité du temps de transmission des messages d'un bout à l'autre de l'océan, plutôt qu'un seul jour.

On consulte les experts

L'idée d'envoyer des messages en Europe à la vitesse de la lumière déclenche l'intérêt de Field, mais avant d'aller plus loin, il lui faut des réponses. Il veut savoir si un câble immergé peut résister longtemps et interroge la Marine en ce sens. Sa lettre parvient au lieutenant Matthew Fontaine Maury, qui a procédé à des sondages des fonds marins de l'Atlantique et sera plus tard connu comme le père de l'océanographie américaine.

Or, quelques années plus tôt, Maury, au fil de ses recherches sur les courants et les vents marins, était arrivé à la conclusion qu'il existait un plateau peu profond entre Terre-Neuve et l'Irlande. Et en 1853, des sondages le long du trajet l'avaient conforté dans cette idée (celle-ci se révéla fautive quelques années plus tard : les sondages, trop écartés, ne rendaient pas compte d'accidents de terrain intermédiaires).

Maury, enthousiaste, nomme plateau télégraphique ce fond marin et plaide en faveur du projet. D'autant qu'il a prélevé des échantillons du plancher océanique : des coquillages, des diatomées, des échantillons de vie sous-marine, et pas un grain de sable, ce qui suggère que l'eau est calme et que le fond n'est pas soumis à des courants ou des turbulences à cet endroit.

Une autre difficulté est l'eau elle-même. Un câble électrique doit être isolé de l'eau de mer, conductrice. Une solution est fournie par une gomme, la gutta-percha, issue du latex d'une plante de Malaisie. La gutta-percha est plastique par nature. Elle se déforme

■ L'AUTEURE



Ainissa RAMIREZ, docteure en science des matériaux, a été maître de conférences

à l'université Yale avant de se consacrer à la vulgarisation scientifique.

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



SANS LA TÉNACITÉ et le sens des affaires de Cyrus West Field (1819-1892), le câble transatlantique n'aurait probablement pas été posé si vite après la guerre de Sécession.

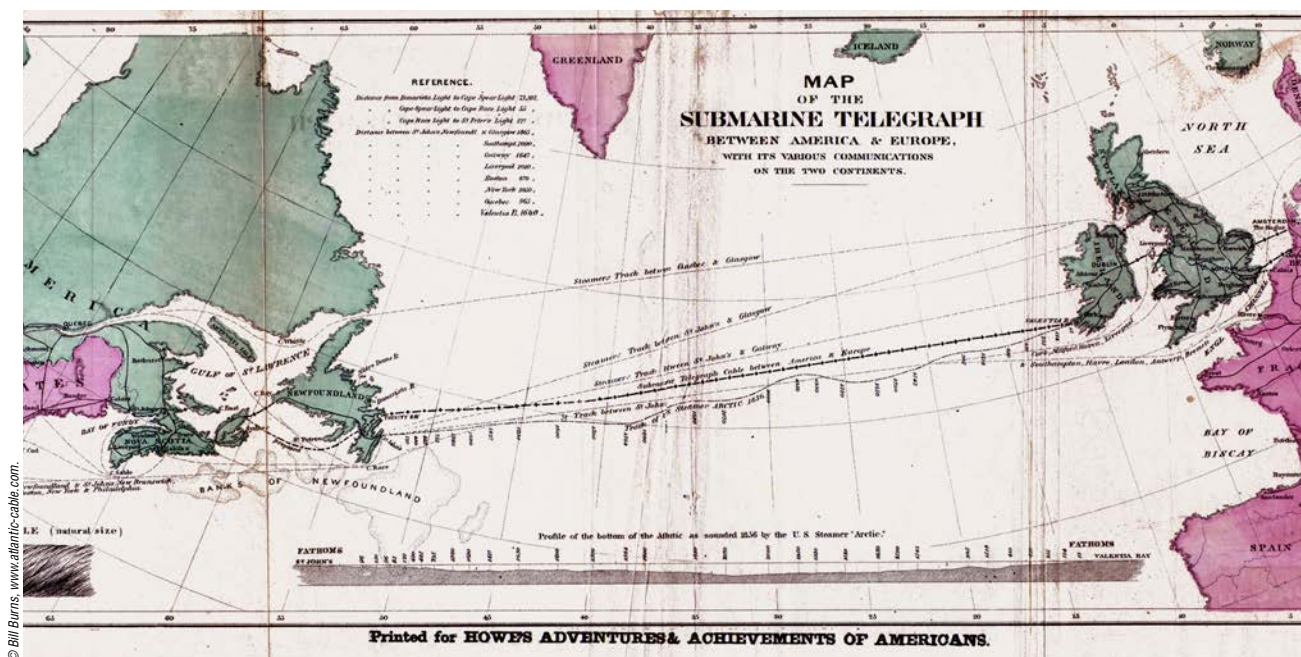
facilement dans l'eau chaude et, une fois refroidie, redevient ferme, mais flexible. Des physiciens tels que Michael Faraday, James Clerk Maxwell et William Thomson (qui sera connu plus tard sous le nom de Lord Kelvin) affirment que son pouvoir isolant est supérieur à celui du caoutchouc, lequel est par ailleurs difficile à utiliser et se dégrade facilement. Le câble doit comporter un noyau de sept fils de cuivre enrobés de gutta-percha et protégés d'une gaine extérieure de fils d'acier et de chanvre.

Field a aussi besoin de savoir si des signaux électriques peuvent se propager sur de longues distances. Il contacte Samuel Morse, l'inventeur éponyme du code binaire à base de points et de traits. Morse a connecté le premier câble télégraphique entre Baltimore et Washington et y a transmis le premier message, plein d'appréhension : «Quelle œuvre Dieu a faite!» Field l'ignore, mais Morse a déjà expérimenté des câbles immergés, qui ont fonctionné. Il a même prédit en 1843 qu'«on établirait sans aucun doute une liaison télégraphique transatlantique de type électromagnétique». Muni d'informations aussi rassurantes, Field se met à imaginer un réseau de fils de cuivre traversant l'Atlantique.

À la conquête de l'Atlantique

Deux tâches l'attendent : relier Terre-Neuve, puis connecter l'autre rive de l'Atlantique. Aucune n'est aisée, et c'est bien du sens des affaires de Field et de sa perspicacité que le projet a besoin. Gisborne, bien qu'à l'origine de l'idée, ne joue plus qu'un rôle mineur en tant qu'ingénieur avant de retourner au Canada poursuivre sa carrière dans la télégraphie. Il est vrai que Terre-Neuve, avec son terrain hostile, sa mer déchaînée et ses icebergs menaçants, est de nature à décourager plus d'un. Field et ses ouvriers tiennent bon. Et après des mois de lutte pour installer des fils de cuivre dans cette contrée sauvage, Field s'attaque enfin à la partie la plus difficile du projet : poser un câble à travers l'Atlantique.

La première tentative, en août 1857, est un échec. La deuxième, en 1858, bénéficie de progrès, dont une amélioration du système de pose qui s'était bloqué lors du premier essai. Cette fois, les bateaux se rendent au milieu de l'Atlantique, raccordent leurs câbles et partent en pose, chacun vers une côte. Les deux équipages restent en contact



© Bill Burns, www.atlantic-cable.com

permanent par le câble. Pour le vérifier en continu, William Thomson, conseiller scientifique du projet, a conçu un dispositif: un galvanomètre miroir capable de détecter le faible signal électrique transmis le long du câble. Cet appareil est constitué d'une bobine de fil en cuivre avec, en son centre, un miroir rond suspendu à une fibre de soie et couplé à de petits aimants. Lorsqu'un courant traverse la bobine, les aimants – et donc le miroir – pivotent légèrement. En éclairant le miroir et en récoltant l'image du faisceau lumineux sur un écran, on amplifie ainsi suffisamment le signal pour détecter les points et traits transmis.

Après une terrible tempête, les bateaux jointent leurs câbles et se mettent en route. Mais au kilomètre 130, le signal disparaît; les bateaux reviennent l'un vers l'autre et reconnectent les câbles, avant de reprendre la route. Les câbles se déroulent régulièrement jusqu'au kilomètre 320, où le signal s'évanouit pour ne jamais revenir.

Après ce deuxième échec, les deux bateaux font route vers l'Angleterre. On est à la mi-juillet. Déçu, mais pas découragé, Field estime que l'été lui laisse encore assez de temps pour une autre tentative si les préparatifs sont rapides. Très vite, une troisième tentative a lieu, fin juillet 1858. Les deux navires se replacent au milieu de l'Atlantique et recommencent à poser leurs câbles, chacun dans sa direction.

À la fin du premier jour, le signal disparaît mystérieusement, puis revient, comme par miracle. D'autres problèmes surgissent.

LE CÂBLE TRANSATLANTIQUE DE 1858 fut le premier posé en intégralité entre Terre-Neuve et l'Irlande. Sur cette carte, son tracé (la ligne parsemée de croix) est ici accompagné de sondages effectués en 1856 le long du parcours (voir la ligne pointillée inférieure et sa projection en dessous).

L'influence magnétique de la gaine d'acier entourant le câble perturbe les boussoles, ce qui fait dévier le *Niagara* de sa route. Il en résulte un gaspillage de sa précieuse cargaison, qui menace de ne plus être disponible en quantité suffisante. Par chance, un petit navire accompagne le *Niagara* et peut lui montrer le chemin. Le *Niagara* arrive à Terre-Neuve avec un câble en état de fonctionnement. De même, dans l'autre direction, l'*Agamemnon* surmonte ses difficultés et atteint bientôt les côtes de l'Irlande avec un câble également en état de marche.

149 mots en dix heures

Le 16 août 1858, Field envoie le premier message officiel par câble transatlantique: «Gloire à Dieu au plus haut des cieux; paix et bienveillance envers les hommes sur Terre.» En fait, avec tous les essais effectués, il s'agit du 129^e message, transmis le septième jour de l'opération. Pour commémorer l'événement, la reine Victoria envoie au président américain James Buchanan un message de félicitations de 98 mots, auquel celui-ci répond par une longue missive de 149 mots. La transmission du premier prend seize heures, celle du second dix heures.

Les techniciens du télégraphe remarquent toutefois que quand un trait

arrive, il est immédiatement suivi d'un point, ce qui rend le message difficile à décoder. De plus, les signaux électriques subissent un retard de transmission qui les transforme en impulsions plus faibles et plus longues, et les techniciens perdent un temps fou à confirmer et répéter les messages. Edward Wildman Whitehouse, un chirurgien qui se passionne pour le télégraphe et a déjà travaillé sur la transmission de signaux sur de longues distances, est le conseiller scientifique principal, ce qui n'arrange pas les choses. Arrogant et têtu, il se querelle avec Thomson sur la façon de résoudre ce problème de transmission.

Thomson savait que la transmission sous-marine de signaux serait délicate, à cause d'une loi qu'il a mise en évidence en 1854: le retard de transmission d'un message est proportionnel à la capacité et à la résistance du câble, elles-mêmes proportionnelles à la longueur du câble. Thomson suggère de raccourcir les signaux (l'avenir prouvera qu'il a raison). Whitehouse, lui, pense qu'il faut amplifier le signal en augmentant la tension. Sa solution se révèle désastreuse. Lorsqu'il l'essaie, il brûle le câble, qui ne fonctionnera plus.

Quatre cents messages ont circulé au cours des quatre semaines de vie de la liaison. Brusquement privé d'un mode de

■ BIBLIOGRAPHIE

G. Cookson, *The Cable*, 2^e éd., Tempus Publishing, 2006.

D. Tarrant, *Atlantic Sentinel*, Flanker Press, 1999.

E. Wünschendorff, *Traité de télégraphie sous-marine*, Librairie polytechnique, Baudry et C^{ie}, 1988.

A. Clarke, *Voice Across the Sea*, HarperCollins, 1975.

B. Dibner, *The Atlantic Cable*, Burndy Library, 1959.

communication qu'il avait si ardemment souhaité, le public s'insurge contre Field. Les gens se sentent trompés et pensent que cette liaison transatlantique était une imposture. Field est proche de la faillite et n'obtient plus aucun soutien. Mais l'attention se détourne du télégraphe. La guerre de Sécession a éclaté, et les Américains ont d'autres soucis que le câble.

Pendant la guerre, Field s'active pour préparer et financer un autre câble. Il est récompensé de ses nouveaux efforts. Depuis sa dernière tentative, un navire géant capable de transporter la totalité du câble a été construit: le *Great Eastern*. L'ingénieur Isambard Brunel a conçu le *Great Eastern* pour assurer la continuité territoriale du Commonwealth en reliant l'Angleterre, l'Australie et les Indes sans escale de ravi-

découvrir la portion défectueuse. On finit par trouver de petites aiguilles de fil d'acier qui se sont détachées de l'armature métallique du câble et ont pénétré en son cœur. Quatre jours plus tard, nouveaux ennuis. Même cause. Field pense à du sabotage et se tient en éveil, mais plus aucun indice de malveillance ne se manifeste.

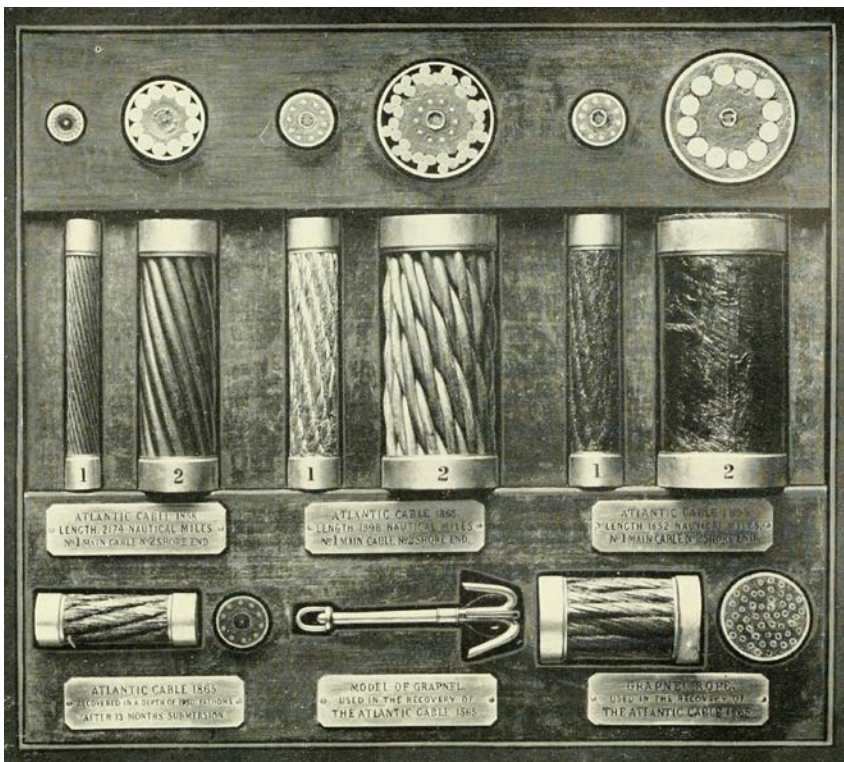
Les trois jours suivants, des centaines de kilomètres de câble sont posés sans problème jusqu'au kilomètre 1 800, où se produit une rupture due à une portion de câble défectueuse. Le capitaine du navire essaie de retrouver l'extrémité du câble avec une corde et un grappin, en se servant de la tension de la corde pour « sentir » le câble au fond de l'océan. Après quatre tentatives de plusieurs jours chacune, le *Great Eastern* est contraint de s'arrêter. Les réserves, la nourriture et le moral à bord ont atteint un niveau dangereusement bas. On laisse une bouée pour marquer la position de l'extrémité du câble.

Le succès, enfin !

Le câble destiné à la cinquième tentative est vite fabriqué et un nouveau système de dragage du câble est installé. Le navire appareille le vendredi 13 juillet 1866, sans que personne ne prête attention au présage lié à une telle date. Quasiment sans difficulté, le *Great Eastern* atteint Terre-Neuve et y mouille dans le port le plus profond capable de l'accueillir, un petit village de pêcheurs de 400 habitants nommé Heart's Content. On tire le câble à terre pour le contrôler: tout va bien. Les réjouissances commencent, mais Field est préoccupé. Il veut récupérer le câble perdu lors de l'essai précédent.

En trois jours, le *Great Eastern* est de retour sur le lieu de la rupture. Après trente essais pour le repêcher, on récupère le câble et on le connecte à un autre. Le *Great Eastern* revient avec un deuxième câble opérationnel. Field a enfin réussi. Neuf ans après la première tentative, il a solidement relié les deux rives de l'Atlantique.

Comme tout innovateur, Field n'imagine pas l'impact qu'aura sa réalisation, mais il espère qu'elle servira à empêcher l'incompréhension entre nations et à « désamorcer tous les préjugés. » De fait, un message transatlantique aurait sûrement changé la donne dans certaines situations. Prenons par exemple la guerre de 1812. La France, l'Angleterre et les États-Unis se



CETTE BOÎTE D'ÉCHANTILLONS montre les différentes configurations de fils et d'enrobages utilisées dans les premiers câbles transatlantiques.

taillement. Mais ce bateau s'est heurté à la dureté des temps et a été mis aux enchères pour une fraction de son coût. Field pense que le *Great Eastern* peut réduire le risque d'échec; il en fait donc le nouveau moyen d'acheminement du câble de cuivre.

La quatrième tentative a lieu en 1865. Le *Great Eastern* embarque la totalité du câble et part de Valentia, en Irlande, pour Terre-Neuve. Mais au kilomètre 120, les ennuis commencent. Le signal faiblit et il faut relever le câble. L'énorme bateau met près de deux jours à revenir en arrière et à

sont combattus en 1814 lors de la bataille de la Nouvelle-Orléans, qui fut un carnage. L'Amérique triompha, sous la conduite du général Andrew Jackson, qui s'empressa de se porter candidat à la présidence. Or un traité de paix avait été conclu avant le début de la bataille, mais la nouvelle arriva trop tard d'Europe. Le câble aurait sauvé des vies, et les billets de vingt dollars auraient peut-être affiché un autre portrait.

En tout cas, le câble de cuivre illustre comment la technologie fait évoluer la vie des gens. Avant le câble, Heart's Content, à Terre-Neuve, était un petit hameau de pêcheurs. Le câble installé, une nouvelle classe sociale aisée, composée des employés de la station télégraphique, a envahi le village; elle y a importé de coûteux aménagements et en a chassé les habitants, ce qui a créé des conflits. Remplacez «station télégraphique» par «sociétés de l'Internet» et «Heart's Content» par «baie de San Francisco»: la similitude avec des mutations actuelles est frappante.

Field espérait que le câble améliorerait la communication, développerait les affaires et éviterait les conflits. Les

historiens assurent qu'en plus de tout cela, le câble a contracté le temps et l'espace, libéré l'information des contraintes géographiques, stimulé la mondialisation, favorisé l'essor du journalisme et renforcé l'impérialisme. Mais son rôle ne s'arrête pas là. Le câble et le télégraphe ont amené de surprenantes modifications, en particulier dans le langage. En 1866, envoyer un message de dix mots coûtait environ 100 dollars, soit environ 1 300 dollars actuels. Ce coût a forcé la presse à rédiger les nouvelles dans un style concis et neutre. Ernest Hemingway attribuait son style, épuré et incisif, au fait que, durant sa jeunesse, en 1917, il avait travaillé dans une rédaction.

Le câble télégraphique a amorcé une évolution du langage qui se poursuit encore avec la contrainte des 140 caractères des messages sur Twitter, les émoticônes et le foisonnement d'abréviations qui accompagnent le développement des réseaux sociaux. Quelle sera la prochaine étape? On l'ignore. Mais une chose est sûre: l'humanité crée la technologie qui, à son tour, recrée l'humanité. ■

■ SUR LE WEB

Le site de l'Association des amis des câbles sous-marins rassemble de nombreux documents historiques sur l'histoire des câbles sous-marins: www.cablesm.fr/
Il s'agit d'une des 49 associations de la fédération culturelle de la Poste et de France Telecom (fnarh.com), dont le prochain colloque aura lieu du 17 au 19 mai 2017 à Métabief, dans le Haut-Doubs.

Une mine d'informations (en anglais) sur l'histoire du câble transatlantique: <http://atlantic-cable.com>

LES RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM {Partagez les savoirs}

UNE EXPO, DES DÉBATS
Lundi 6 mars – 18h :
Ours : leur conservation en questions
Avec O. Guder, administrateur de l'association Férus, animateur région Île-de-France, P. Haffner, chef du pôle espèces, SPN, MNHN, M. Jung, présidente de l'association Animals Asia, R. Marion, photographe naturaliste.

CYCLE DE CONFÉRENCES
Quand tourisme responsable rime avec biodiversité
Lundi 13 mars – 18h : **Le Conservatoire du littoral : plus de 40 ans d'actions au service des territoires**
Avec O. Gauthier, directrice du Conservatoire du littoral et des rivages lacustres.
Lundi 20 mars – 18h : **Les parcs nationaux de France : entre préservation du patrimoine et accueil du public**
Avec G. Landrieu, adjoint au directeur de Parcs nationaux de France et L. Chabanis, chargée de mission "Tourisme et accès à la nature" à Parcs nationaux de France.
Lundi 27 mars – 18h : **La Baie de Somme - Grand Site de France : la Nature en Capital !**
Avec S. Desanlis, directeur de l'Environnement du Syndicat Mixte Baie de Somme - Grand Littoral Picard.

TABLE-RONDE
Soirée Prédateurs
Samedi 25 mars – 17h :
Ours, lynx, loup..., quelle cohabitation possible avec l'homme ?
Suivie de visites guidées thématiques.
Avec P. Haffner, D. Jullien-Laferrière, Y. Le Maho, P. Paillet, M. Patou-Mathis, G. Véron

FILM
Cycle Pousse-Pousse
Dimanche 26 mars - 16h : **L'enfant qui voulait être un ours (78', dès 5 ans)**
Par J. Astrup, France/Danemark, 2002.

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution - 36 rue Geoffroy St-Hilaire, Paris 5^e

Au Jardin des Plantes
Détails sur mnhn.fr, rubrique : "les rendez-vous du Muséum"

POUR LA SCIENCE

MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE

LOGIQUE & CALCUL

Le vivant, plus fort que l'électronique

Des systèmes biologiques sont capables d'enregistrer de l'information et de la manipuler, comme le font les ordinateurs. Fondées sur ce constat, de nouvelles technologies informatiques pourraient concurrencer celles d'aujourd'hui.

Jean-Paul DELAHAYE

L'ADN est comme un programme d'ordinateur, mais bien plus avancé que n'importe quel logiciel jamais créé.

Bill Gates

L'idée réductionniste que tout n'est que du calcul dans l'Univers procède de l'idée (passée de mode) que l'Univers n'est qu'une grande horloge. On aurait seulement changé le modèle de référence, qui, de mécanique, serait devenue informatique.

En passant d'un objet matériel et rigide, l'horloge, à un objet idéal plus abstrait et polyvalent, l'ordinateur, nous avons trouvé un moyen de nous représenter le monde d'une manière plus générale et efficace. La métaphore informatique de l'Univers n'est peut-être pas la dernière, mais l'ordinateur est incontestablement bien plus commode que l'horloge pour modéliser la variété et la complexité des objets et des situations du monde. De plus, s'appuyer sur les ordinateurs pour penser l'Univers, c'est considérer que les concepts physiques classiques doivent être complétés : à côté du temps, de la longueur et de la masse, il faut, pour comprendre ce qui se passe, utiliser les concepts d'information et de calcul.

Or on trouve dans les mécanismes biologiques des composants qui, bien utilisés, réalisent des calculs à la demande quand on a maîtrisé leur programmation. L'idée que la biologie, aussi éloignée qu'elle paraisse de l'informatique, est aussi une science du

calcul et de l'information devient année après année plus concrète.

La coopération entre informatique et biologie se développe selon deux axes complémentaires. D'une part, en s'inspirant du monde biologique, on a conçu de nouvelles façons de programmer nos ordinateurs. Avec ces méthodes informatiques inattendues, on résout parfois mieux qu'auparavant des problèmes d'ingénierie.

Imiter le vivant et le faire calculer

Ainsi, les techniques de réseaux de neurones artificiels ont été mises en œuvre pour faire gagner au jeu de go, contre un champion humain, un système informatique (voir Yoshua Bengio, « La révolution de l'apprentissage profond », *Pour la Science* n° 465, juillet 2016).

Il y a aussi les algorithmes génétiques, où l'on mime des mécanismes évolutifs qui sélectionnent des objets informatiques, les systèmes immunitaires artificiels, où l'on copie les principes adaptatifs de l'immunité des vertébrés, les systèmes d'intelligence distribuée, où l'on s'inspire des insectes sociaux qui, collectivement, réalisent d'étonnantes constructions telles que ruches ou termitières, les méthodes de calcul par les membranes, où l'on copie les échanges cellulaires pour imaginer des systèmes algorithmiques nouveaux.

L'autre axe pour relier biologie et informatique, qui sera le sujet de la suite de

l'article, consiste à identifier et à développer des méthodes autorisant une programmation du vivant et l'exploitation de ses capacités à mémoriser de l'information, cela en utilisant uniquement les molécules et les structures biologiques (sans électronique). Deux domaines aujourd'hui ont réussi cet exploit : le calcul et le stockage d'informations fondés sur l'ADN (*DNA computing* et *DNA data storage*) et le calcul avec des cellules (*Synthetic biological circuit* et *Bacterial computing*).

L'informaticien américain Leonard Adleman est bien connu pour sa découverte, avec Adi Shamir et Ronald Rivest, de l'algorithme de chiffrement asymétrique RSA : c'est lui le « A ». Il a été inspiré par la machine de Turing, un mécanisme de calcul imaginé en 1936 dont la mémoire est constituée par un ruban potentiellement infini qu'un automate parcourt, lit et sur lequel il écrit. Or l'ADN polymérase est une molécule qui s'accroche à un brin d'ADN, puis se déplace dessus en « lisant » chaque base rencontrée et en « écrivant » son complément, ce qui fabrique un nouveau brin d'ADN. Leonard Adleman y reconnut un mécanisme proche de celui des machines de Turing, qui peuvent calculer toute fonction mathématique calculable par algorithme. L'analogie l'incita à utiliser des brins d'ADN et les mécanismes moléculaires qui les manipulent pour calculer.

Leonard Adleman comprit cela au cours d'une « nuit de Pascal ». Il raconte : « Je me dressais soudain et fis remarquer à mon

Le chemin hamiltonien codé par des séquences d'ADN

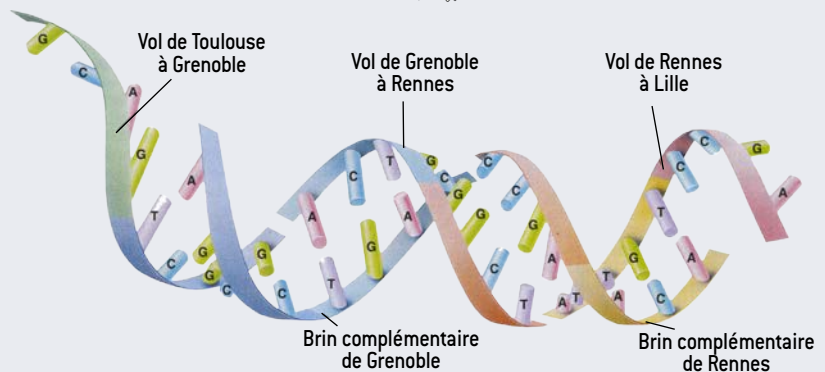
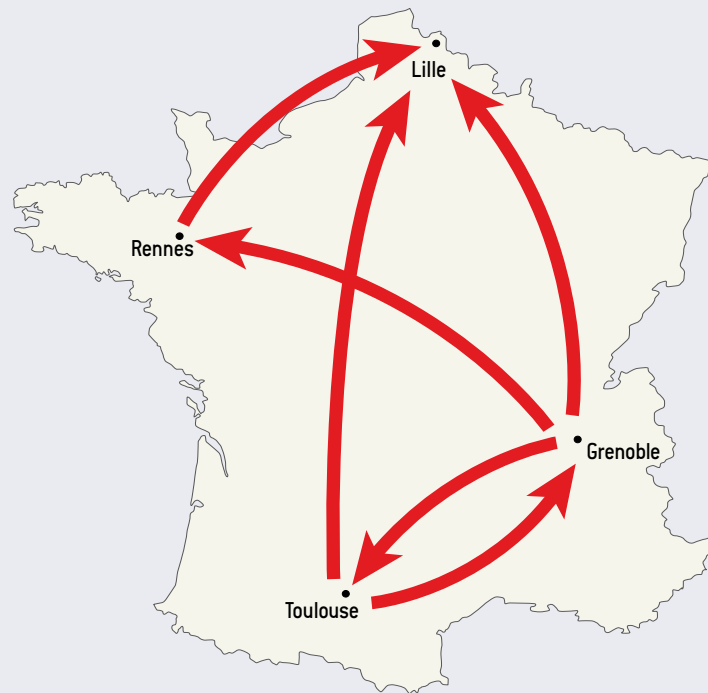
La méthode conçue par l'informaticien américain Leonard Adleman pour résoudre le problème des chemins hamiltoniens est expliquée à partir d'un exemple (emprunté à son article « Calculer avec l'ADN », *Pour la Science*, n° 252, pp. 56-63, octobre 1998).

Imaginons que les vols reliant quatre villes soient ceux dessinés sur le schéma ci-contre. On peut par exemple aller de Grenoble à Lille, mais pas l'inverse. On cherche un chemin partant de Toulouse et arrivant à Lille, qui passe par chacune des quatre villes une fois et une seule.

On choisit pour chaque ville une séquence d'ADN. Pour Toulouse, par exemple, c'est la séquence ACTTG CAG. On nomme « début » les quatre premiers nucléotides, ACTT, et « fin » les quatre derniers, GCAG. On peut alors coder chaque vol en mettant bout à bout la fin de la séquence associée à la ville de départ et le début de la séquence associée à la ville d'arrivée (voir le tableau) et chaque chemin combinant plusieurs vols sera représenté par l'enchaînement des séquences d'ADN correspondantes.

À chaque ville correspond aussi une séquence complémentaire, obtenue en échangeant C et G, et A et T. L'utilisation de ces séquences complémentaires permet de filtrer, dans une soupe contenant au départ les molécules codant tous les chemins possibles jusqu'à la longueur 3 au moins (correspondant au trajet reliant les quatre villes), les molécules qui correspondent aux chemins passant par toutes les villes.

Dans notre problème, il y a un chemin hamiltonien entre Toulouse et Lille, qui sera le seul retenu ayant la longueur voulue et passant par chaque ville. Il passe dans l'ordre par Toulouse, Grenoble, Rennes et Lille. Il est représenté par la séquence GCAGTCGGACTGGGCTA-TGTCCGA, obtenue à l'issue des manipulations de la soupe initiale opérant les filtrages.

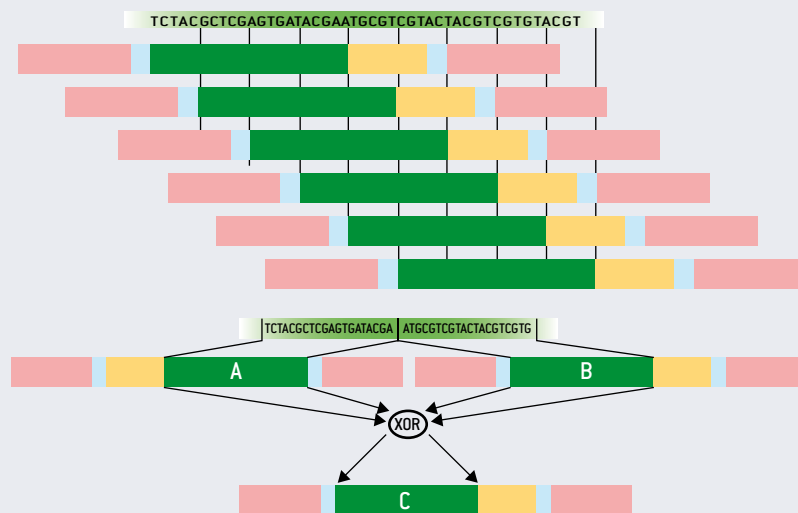


Ville	ADN	Complémentaire
TOULOUSE	ACTTG CAG	TGAACGTC
GRENOBLE	TCGGACTG	AGCCTGAC
RENNES	GGCTATGT	CCGATACA
LILLE	CCGAGCAA	GGCTCGTT

Vol	Code ADN du vol
TOULOUSE-GRENOBLE	GCAGTCGG
TOULOUSE-LILLE	GCAGCCGA
GRENOBLE-RENNES	ACTGGGCT
GRENOBLE-LILLE	ACTGCCGA
GRENOBLE-TOULOUSE	ACTGACTT
RENNES-LILLE	ATGTCGCA

Mémorisation dans l'ADN

James Bornholt et ses collègues ont conçu et mis en application un procédé de mémorisation massive d'informations exploitant les séquences d'ADN. Le procédé se fonde sur l'inscription de couples clé-données, ce qui permet un accès direct aux informations enregistrées analogue à ce qui existe dans la mémoire d'un ordinateur utilisant un système d'adresses : pas besoin, contrairement au cas d'une bande magnétique, de tout parcourir pour retrouver une information.



Le défi relevé était particulièrement difficile pour plusieurs raisons. D'abord, les méthodes de synthèse et de lecture de l'ADN sont imparfaites, avec des taux d'erreurs de l'ordre de 1 % par nucléotide. Les séquences se dégradent aussi progressivement. Il fallait donc concevoir un système fortement redondant. Selon le type de données (image, son, texte), la présence d'une erreur dans les données est plus ou moins grave ; il fallait alors prévoir un système ajustable de redondances.

C'est ce que propose leur procédé. Le point le plus important de leur travail est cependant la mise en place d'un codage qui autorise l'accès à certaines données sans avoir à tout lire. Le système d'adressage conçu utilise la réaction en chaîne par polymérase (PCR, *polymerase chain reaction*) qui amplifie, et donc donne accès, uniquement aux données souhaitées. Bien évidemment, cette lecture choisie accélère l'accès aux données puisqu'elle évite de parcourir tout l'ADN

d'une base de données moléculaire. Notons toutefois que les temps d'accès restent bien supérieurs à ceux de l'électronique et se comptent en heures.

L'information sur les séquences d'ADN doit être inscrite avec des redondances (car la transcription et la lecture amènent des erreurs), ce que plusieurs procédés permettent. On inscrit la longue séquence en s'arrangeant pour que chaque brin d'ADN (plus court que la séquence qu'on veut inscrire) contienne une portion de la séquence à mémoriser et qu'il y ait des chevauchements entre les brins (*schéma du haut*). L'idée utilisée par l'équipe de James Bornholt consiste, pour inscrire la séquence A et la séquence B, à inscrire A sur un brin, B sur un autre et le OU exclusif (XOR) des séquences A et B (après les avoir traduites en binaire), noté C, sur un troisième brin (*schéma du bas*). Les trois séquences A, B, C ont alors pour propriété que la connaissance de deux quelconques d'entre elles (A et B, A et C, B et C) suffit pour retrouver A et B.

épouse : "Bon sang ! Ces choses peuvent calculer." Je ne dormis pas de la nuit, cherchant un moyen d'utiliser l'ADN pour résoudre des problèmes. » La mise au point de mécanismes de calcul fut cependant délicate, car ce que fait la cellule se décompose en opérations élémentaires qui ne permettent pas facilement d'effectuer des opérations complexes. En plus de la copie de brins d'ADN par l'enzyme ADN polymérase, on dispose d'enzymes nommées ligases qui raboutent des molécules d'ADN et d'« enzymes de restriction » qui coupent les molécules d'ADN à des endroits précis. L'enzyme EcoRI, par exemple, coupe l'ADN de la bactérie *Escherichia coli* après le G de la séquence de nucléotides GAATTC.

Des soupes pour mémoriser et calculer

Poursuivant son travail nocturne, dans les jours qui suivirent son eureka, Leonard Adleman conçut et réussit à faire fonctionner un procédé de calcul à base d'ADN et d'enzymes qui résout le problème combinatoire de la recherche des chemins hamiltoniens dans un graphe. Il s'agit de trouver un chemin dans un graphe qui passe par chaque nœud du graphe une fois et une seule. Organiser une tournée visitant des villes fixées à l'avance sur un réseau routier ou aérien revient à résoudre un tel problème.

Ce problème appartient à la classe des problèmes NP-complets. Cela signifie deux choses : d'une part, qu'on ne connaît aucun algorithme rapide qui le résout dès que le nombre de nœuds du graphe devient important (« rapide » signifie que le temps d'exécution est une fonction polynomiale du nombre de nœuds du graphe) ; d'autre part, si l'on connaissait un moyen de résoudre rapidement ce problème, on pourrait aussi résoudre rapidement, c'est-à-dire en temps polynomial, tous les problèmes de la classe NP (problèmes dont on peut vérifier qu'une solution est correcte en temps polynomial).

L'algorithme proposé et mis en œuvre par Leonard Adleman en 1994 avec des soupes moléculaires réelles est le suivant :

- On engendre toutes les séquences possibles correspondant à des chemins

Le potentiel de la mémoire à ADN

La quantité totale d'informations numériques sur Terre est aujourd'hui de l'ordre de 10^{20} (1 Zo = 1 zettaoctet = 10^{21} caractères), soit 10^{22} caractères, ou 5 milliards de milliards de pages imprimées de 2 000 caractères.

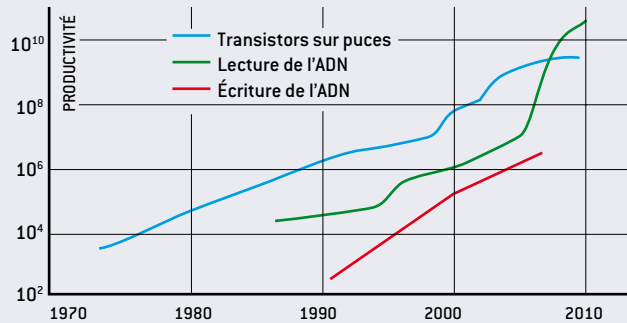
Si l'augmentation se poursuit au rythme des dernières décennies, nous serons incapables, par les moyens utilisés aujourd'hui, de répondre à la demande d'archivage de ces données.

Aussi étudie-t-on des moyens de stockage autres que magnétiques ou optiques. Les méthodes exploitant l'ADN pourraient être la solution pour le stockage massif à long terme, d'autant que la densité d'information envisageable avec de l'ADN est bien supérieure à celle des meilleures mémoires magnétiques ou optiques. Ce n'est peut-être pas étonnant : la mémorisation par l'ADN se fait à l'échelle de la molécule, ce qui n'est pas le cas en électronique ou en optique.

Les trois courbes calculées par Rob Carlson (un investisseur américain dans

la bioéconomie) montrent que le rythme de croissance de la puissance informatique, qui suit la loi de Moore (doublement tous les 18 mois à peu près depuis plus de quarante ans), reste plus faible que celui de l'efficacité des dispositifs d'écriture et de lecture de l'ADN. Cependant, si un moyen de stockage permet d'écrire et de lire vite, alors il ne conserve pas l'information longtemps.

Comparons les performances des quatre techniques que sont les mémoires



flash (clés USB, disques SSD), les disques durs des ordinateurs, les bandes magnétiques et l'ADN. Les temps d'accès se mesurent respectivement en millisecondes, en dizaines de millisecondes, en minutes et en dizaines d'heures.

Les durées de conservation sont respectivement de l'ordre de 5 ans, 5 ans, 15-30 ans et plusieurs siècles. Le stockage sur de l'ADN, bien que lent, apparaît donc beaucoup plus durable.

aléatoires selon un codage [expliqué dans l'encadré page 79], et ce jusqu'à la taille n , le nombre de nœuds du graphe.

– On filtre les séquences selon leur masse pour ne garder que les chemins de longueur n .

– On filtre en plusieurs étapes les séquences restantes en utilisant les mécanismes moléculaires connus, pour ne garder dans la soupe que les chemins passant une fois et une seule par chaque nœud.

– Les séquences qui restent indiquent des chemins hamiltoniens.

Cette méthode exploite le parallélisme des réactions chimiques qui, d'un endroit à l'autre de la soupe moléculaire, « calculent » simultanément, c'est-à-dire essaient des chemins différents en éliminant les chemins insatisfaisants. En théorie, le problème est résolu en un nombre d'étapes de réactions chimiques qui croît linéairement en fonction du nombre de nœuds du graphe. On disposerait donc d'une méthode de résolution en temps polynomial d'un problème NP-complet, et, en conséquence, d'une méthode polynomiale pour résoudre

n'importe quel problème de la classe NP, ce qui serait une avancée considérable.

Il faut cependant tempérer notre enthousiasme, car la quantité d'ADN nécessaire augmente exponentiellement en fonction de la taille du problème, à cause de la première étape de l'algorithme.

Plus que la masse de la Terre!

Une machine à ADN qui résoudrait le problème pour un graphe de 200 sommets pèserait environ 10^{25} kilogrammes, soit plus que la masse de la Terre ! L'algorithme impose la mise à disposition d'un très grand nombre de types distincts de la molécule d'ADN qui participeront à la réaction, car il faut que chaque chemin possible de longueur n soit présent au départ. Or les préparer n'est pas simple et prend du temps.

De plus, avec les méthodes utilisées, il existe une probabilité non nulle que certains chemins ne soient pas représentés et donc que l'on passe à côté d'une solution du problème. Ces obstacles n'ont pas permis de

tirer du procédé de Leonard Adleman une méthode plus efficace que celles des machines électroniques pour le problème des chemins hamiltoniens.

Depuis la création de ce premier algorithme, tout un domaine scientifique nouveau s'est développé. Ses chercheurs se retrouvent périodiquement au colloque *DNA computing and molecular programming*, dont la 22^e édition s'est réunie en septembre 2016 à Munich. Toutes sortes d'algorithmes à ADN sont aujourd'hui maîtrisés et ont donné lieu à des mises en œuvre pratiques à petites échelles.

On a en particulier proposé des systèmes assimilables à des ordinateurs où l'on entre des données sous la forme de soupes moléculaires et où, après le calcul, on lit le résultat à nouveau en analysant les molécules fabriquées pendant les phases de réaction et les longues étapes de filtrage [voir l'article de Y. Benenson et al. dans la bibliographie]. On a aussi conçu un système qui joue au jeu tic-tac-toe, une sorte de morpion sur une grille 3×3 [voir « Des assemblages d'ADN rompus au jeu et au travail », *Pour la Science*, janvier 2009].

Aujourd'hui pour certains problèmes combinatoires particuliers tels que celui de l'affectation des tâches, les chercheurs, notamment Jian-Jun Shu et ses collègues à Singapour, espèrent que les ordinateurs à ADN seront plus efficaces que les ordinateurs classiques. Dans ce problème, on se donne une série de travaux à exécuter et d'agents aux compétences variables selon les tâches auxquels on les affecte (confier la tâche T à l'agent A à un coût C) et l'on cherche à savoir comment assigner une tâche à chaque agent en minimisant le coût total.

Plus surprenant, des algorithmes de multiplication rapide fondés sur des méthodes moléculaires ont aussi été décrits, notamment par Aran Nayebe, de l'université Stanford.

Théorie... et pratique?

En théorie, la puissance des machines à ADN est énorme. Avec un litre de liquide contenant 5 grammes d'ADN, on disposerait d'une mémoire de plus de 10^{21} octets et d'une puissance de calcul évaluée à environ 10^{17} opérations par seconde, soit 100 pétaflops, ce qui est supérieur aux performances du plus puissant ordinateur actuel, le chinois Tianhe-2, qui ne réalise que 33 pétaflops.

Ce potentiel est cependant délicat à exploiter et aujourd'hui, malgré tous les efforts faits, les ordinateurs à base d'électronique sont bien plus faciles à programmer, calculent mieux et plus vite. On pourra peut-être les surpasser en utilisant des soupes à ADN et il faut continuer à explorer cette voie. Mais ce n'est pas facile, car du côté électronique les progrès sont réguliers et donc les systèmes à ADN luttent contre un concurrent de plus en plus difficile à rattraper !

Notons aussi qu'il n'est pas absurde de penser que, dans le cadre de la physique classique, un modèle de calcul qui résoudrait en temps polynomial les problèmes NP-complets ne peut exister matériellement. Les gains envisageables avec les calculateurs à ADN risquent donc d'être réservés à des problèmes particuliers et ne conduire qu'à des progrès limités, contrairement aux espoirs initiaux. Même les ordinateurs quantiques, d'après le spécialiste Scott Aaronson,

ne pourront pas résoudre en temps polynomial les problèmes NP-complets, qui semblent condamnés à rester hors de portée de tout ce que nous pouvons concevoir comme calculateurs. Ne rêvons pas trop !

Mémoires massives et durables

Récemment, en perfectionnant les méthodes de stockage d'informations par l'ADN, on a cependant réalisé des exploits qui montrent que les mécanismes de stockage de données mis au point par l'évolution du vivant pourraient être utiles et que la manipulation de l'ADN nous donnera sans doute les clés permettant la mémorisation, sur le très long terme, de quantités massives de données.

En effet, lorsqu'on souhaite garder pour des siècles des quantités importantes d'informations, on sait que ni les disques optiques (*Blu-ray* ou autres) ni les mémoires magnétiques (bandes, clés USB à mémoire flash, disques souples ou durs à plateau rotatif, ou disque SSD – *Solid-state drive*) ne sont vraiment fiables. À l'opposé, des expériences réalisées avec de l'information stockée sous forme de séquences d'ADN indiquent que l'on peut s'y fier.

En 2015, Robert Grass et son équipe, de l'École fédérale polytechnique de Zurich, ont inscrit des informations sur de l'ADN placé dans des matériaux inorganiques. Ils ont utilisé des codes correcteurs d'erreurs pour introduire de la redondance dans l'information inscrite et corriger à la lecture les petites dégradations susceptibles de se produire.

Leur expérience a consisté précisément à traduire 83 kilooctets (83 000 caractères) d'informations sur 4 991 segments d'ADN, chacun long de 158 nucléotides, qui ont été encapsulés dans de la silice. Des traitements de vieillissement accéléré ont été appliqués pour mesurer la vitesse de dégradation de l'ADN. L'information originale a été lue sans erreur, même après avoir chauffé la silice à 70° C pendant une semaine, ce qui est thermiquement équivalent au stockage d'informations sur l'ADN pendant 2 000 ans à température ambiante. On en a déduit que des données peuvent être archivées dans l'ADN pendant des millénaires.

D'autres expériences ont été effectuées et l'on s'est amusé à écrire dans de l'ADN des sonnets de Shakespeare, un passage de l'enregistrement du discours « I have a dream » de Martin Luther King et l'article scientifique célèbre de James Watson et Francis Crick sur la structure de l'ADN.

Le coût estimé de ces enregistrements est aujourd'hui de l'ordre de 10 000 euros par mégaoctet (1 million de caractères) pour l'écriture, et de 200 euros par mégaoctet pour la lecture. C'est assez cher, mais cela baisse rapidement avec les progrès des méthodes de synthèse et de séquençage. Nous avons donc de bonnes raisons de croire qu'à court terme, dans une dizaine d'années, nous disposerons de méthodes de stockage de ce type, compétitives et adaptées aux longues durées, qui exploiteront l'ADN ou peut-être d'autres molécules biologiques. L'équipe de Zurich imagine ainsi bientôt stocker le contenu de l'encyclopédie Wikipédia dans une archive à base d'ADN.

Des codes-barres moléculaires

On envisage aussi d'utiliser ces méthodes pour réaliser des codes-barres moléculaires marquant des objets ou des solutions, ce qui aiderait à protéger de la contrefaçon des parfums ou des molécules pharmaceutiques. On mélangerait de très petites quantités de molécules de synthèse où une sorte de signature aurait été inscrite. Un appareillage de lecture donnerait rapidement l'information qu'un produit est authentique ou, à l'inverse, qu'il est contrefait. On pourrait également tracer ainsi la provenance d'armes à feu et pister les trafiquants.

Tout récemment, en juillet 2016, James Bornholt, de l'université de Washington, et des chercheurs de Microsoft ont présenté une méthode d'archivage massif fondée sur l'ADN permettant des accès en lecture relativement rapide pour l'information qui serait ainsi stockée. Une méthode qui atteint un record de 200 mégaoctets d'informations enregistrées.

Les calculs de la capacité de ces technologies montrent qu'elles ont un potentiel supérieur, à moyen terme, à celui des technologies à base de silicium.

Si les difficultés du calcul avec l'ADN se confirment en même temps que les succès du stockage moléculaire de données, nous serons en mesure d'affirmer que l'électronique est le meilleur moyen de faire rapidement du calcul (qu'on pourra encore pousser plus loin avec des méthodes quantiques), mais que pour le stockage, ce qu'a mis au point la nature est plus économique, plus robuste et capable de stocker plus massivement l'information que nous souhaitons préserver pour de longues périodes.

Des cellules vivantes programmées

Mentionnons un autre type d'exploit dans le domaine du calcul biologique. Il vient d'être réalisé par une équipe de chercheurs réunis autour de Nathaniel Roquet, du MIT, et ouvre la perspective de programmer à volonté des cellules vivantes (et non plus de soupes moléculaires en bouteille) qui deviendraient des automates à notre service et seraient aussi complexes qu'on le souhaite.

Les cellules vivantes exécutent des sortes de programmes qui, en fonction de leur identité et des signaux chimiques qui leur parviennent, les font réagir de manière spécifique, par exemple en envoyant d'autres signaux chimiques dans la cellule ou à l'extérieur. Jusqu'à présent, on ne savait ni simuler ni reproduire ces réseaux de régulation avec des programmes génétiques artificiels qui, à l'opposé de ceux envisagés par Leonard Adleman, n'ont pas pour objectif un calcul combinatoire ou abstrait, mais une réaction particulière programmée, qui produit une interaction déterminée au sein de la cellule ou avec d'autres cellules. La compréhension et la mise au point de circuits artificiels internes aux cellules qui reconnaissent des entrées successives arrivant dans un ordre fixé et qui répondent spécifiquement semblaient difficilement atteignables. On sait maintenant que c'est possible.

La méthode conçue a pour effet de créer biologiquement des machines à états : la cellule programmée se met dans un état qui est déterminé par la série d'informations qu'elle reçoit et dont l'ordre importe. Ces machines à états biologiques s'appuient sur

des enzymes nommées recombinaisons. Quand une recombinaison est activée par un signal chimique, elle enlève ou inverse un segment particulier d'ADN situé entre deux portions de séquences qui délimitent le segment et qui sont spécifiques à la recombinaison. La séquence (retirée ou inversée) peut contenir des sites de reconnaissance pour d'autres recombinaisons qui pourront alors répondre à d'autres signaux chimiques.

Après avoir créé de tels circuits qui enregistrent des événements, les chercheurs ont incorporé des gènes dans le réseau des séquences manipulées. Dans ces circuits, l'ADN se réorganise, ce qui non seulement enregistre des informations, mais détermine l'activité des gènes, ces derniers étant activés ou désactivés selon les signaux reçus. Les chercheurs ont testé cette approche avec des gènes qui codent pour différentes protéines fluorescentes. Les cellules qui contiennent le circuit artificiel auront par exemple la propriété de présenter une fluorescence rouge si elles reçoivent le signal A puis le signal B, alors que si elles reçoivent le signal B puis le signal A, elles présenteront une fluorescence bleue.

Un ordinateur-univers en perpétuelle reprogrammation

La biologie est une science où le calcul et l'information jouent des rôles centraux. Aujourd'hui, on progresse encore et au lieu d'être simplement les spectateurs de ces calculs et mémorisations d'informations que la vie opère pour fonctionner et se perpétuer, nous apprenons à utiliser et à programmer nous-mêmes des mécanismes moléculaires de traitement de l'information pour en faire ce qui nous arrange.

C'est merveilleux, et cela donne de nouveaux arguments à ceux qui voient dans l'Univers un grand ordinateur : les organismes vivants constitueraient des lieux où s'effectueraient des calculs particulièrement intenses, et leur évolution s'interpréterait comme un perfectionnement de l'ordinateur-univers, qui se reprogrammerait constamment.

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

N. Roquet *et al.*, **Synthetic recombinaison-based state machines in living cells**, *Science*, vol. 353, 22 juillet 2016.

A. Exrance, **How DNA could store all the world's data**, *Nature*, vol. 537, pp. 22-24, 2016.

J. Bornholt *et al.*, **A DNA-based archival storage system**, *Proceedings of the 21st International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*, ACM, 2016.

V. Zhirnov *et al.*, **Nucleic acid memory**, *Nature Materials*, vol. 15, pp. 366-370, 2016.

V. Zhirnov et Ralph Cavin III, **Microsystems for Bioelectronics**, William Andrew, 2^e éd., 2016.

Y. Benenson *et al.*, **An autonomous molecular computer for logical control of gene expression**, *Nature*, vol. 429, pp. 423-429, 2004.



Retrouvez la rubrique
Logique & calcul sur
www.pourlascience.fr

SCIENCE & FICTION

Glapum'tien, de quelle espèce es-tu ?

Pour répondre à cette question, les naturalistes du XIX^e siècle auraient chassé cet être imaginaire de la bande dessinée pour en prélever un spécimen et le décrire. Mais il est bien plus enrichissant de l'observer dans son environnement...

Jean-Sébastien STEYER et Roland LEHOUCQ. Illustration : Marc BOULAY

Dans les œuvres de fiction, les extraterrestres intelligents sont souvent des humanoïdes qui nous ressemblent. Cet anthropocentrisme persistant passe sous silence les nombreuses autres espèces bien réelles – cétacés, insectes, céphalopodes ou autres – qui présentent elles aussi des formes d'intelligence. Mais heureusement, il existe parfois des exceptions qui confirment la règle, comme c'est le cas des Glapum'tiens.

Les Glapum'tiens sont des extraterrestres de l'univers de « Valérian et Laureline », série de bandes dessinées de Pierre Christin et Jean-Claude Mézières dont la première publication date de 1967 (et dont l'album *L'Ambassadeur des ombres* est en cours d'adaptation au cinéma par Luc Besson). Cette saga narre, dans un futur lointain, les aventures trépidantes de deux agents spatio-temporels censés défendre les intérêts de l'« Empire Terrien » dans l'univers.

Dans l'album *Les Spectres d'Inverloch* (1984), Valérian est envoyé sur la planète Glapum't, où il a pour mission de capturer un Glapum'tien. Notons que le qualificatif de « Glapum'tien » suggère que, à l'image du mot « Terrien » que nous utilisons pour nous qualifier, l'espèce est dominante sur la planète en question. Sur Glapum't, magnifique planète bleue aux paysages côtiers et aux îles inondées par de grandes marées, Valérian fait preuve d'ingéniosité pour capturer à contrecœur un sympathique Glapum'tien : « Je ne suis ni zoologue ni collectionneur [...] et j'ai horreur de chasser

l'autochtone pour rapporter des spécimens, même en état de marche. » Cette phrase évoque très justement les naturalistes des siècles derniers qui tuaient les animaux afin de les prélever, au lieu de les observer ou de les étudier directement dans leur environnement naturel. Dans l'album suivant, intitulé *Les Foudres d'Hypsis* (1985), le Glapum'tien en question devient l'ami de Laureline et Valérian, qu'ils prénomment Ralph.

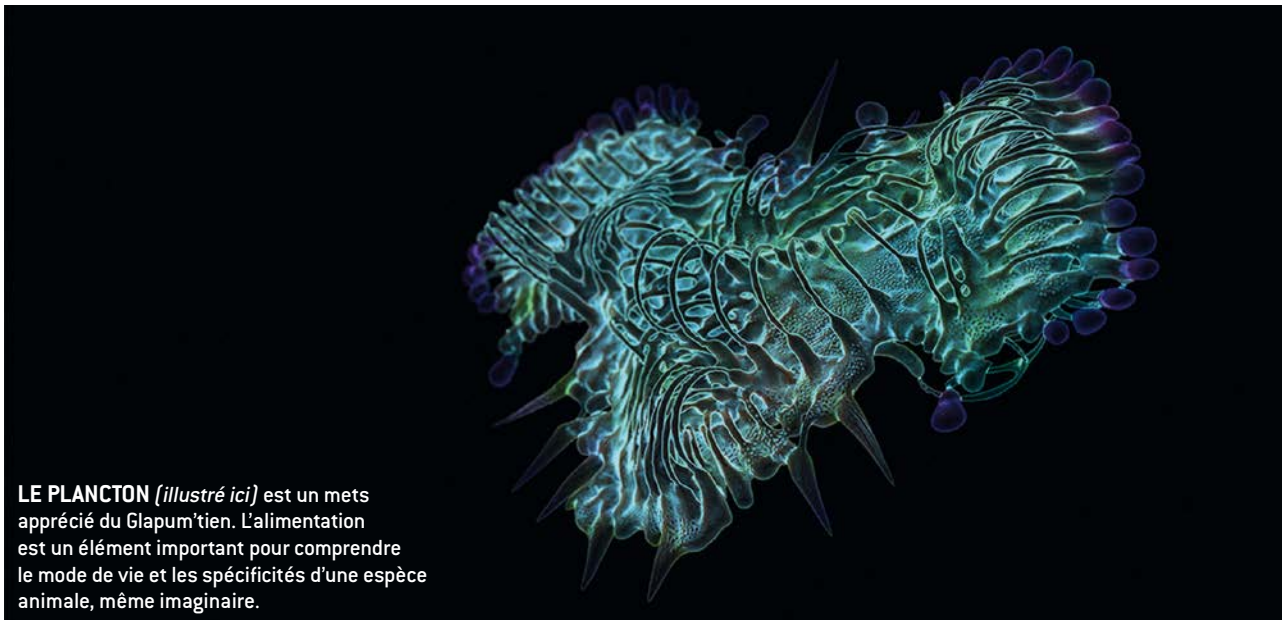
Ralph est un être sensible et intelligent, haut de plus de deux mètres, à grande tête plate en forme de dôme et aux petits yeux malins. Il est doté de quatre tentacules souples et élastiques et d'une longue queue puissante et robuste. Comme les céphalopodes, il n'a pas de cou ; ses membres sont directement situés sous la tête. Mais comme les tétrapodes (vertébrés munis de pattes), Ralph a des doigts. S'agit-il donc d'un mollusque (céphalopode) ou d'un vertébré (tétrapode) ? La réponse est donnée dans *Les Habitants du Ciel – Atlas cosmique de Valérian et Laureline* (1991), sorte d'encyclopédie illustrée, publiée par les auteurs et qui décrit avec grande précision les principales formes de vie rencontrées dans la saga. Verdict : les Glapum'tiens sont des mammifères. Certes, mais lesquels ? Observons Ralph dans son environnement pour en savoir plus.

Ralph est un excellent nageur qui se déplace aussi sur la terre ferme à l'aide de ses membres chiridiens (munis de doigts). Il est alors soit bipède, soit quadrupède. À l'arrêt, la souplesse de ses tentacules ainsi



AVEC SA HAUTE STATURE ET SA PEAU BLEUE, le Glapum'tien, l'un des personnages de la bande dessinée *Les Spectres d'Inverloch*, ne passe pas inaperçu sur la couverture de l'album.

© Christin - Mézières - Dargaud



LE PLANCTON (illustré ici) est un mets apprécié du Glapum'tien. L'alimentation est un élément important pour comprendre le mode de vie et les spécificités d'une espèce animale, même imaginaire.

que la masse *a priori* imposante de sa tête l'obligent à utiliser sa puissante queue comme support. On retrouve cette posture « à trois pattes » chez les kangourous. Ralph serait-il alors un marsupial ? Non, car il ne présente pas cette poche caractéristique du groupe, qui permet aux nouveau-nés de terminer leur développement en milieu extra-utérin.

Les Glapum'tiens présentent, au niveau de la gorge, d'étranges replis cutanés longitudinaux qui semblent directement inspirés des sillons gulaires des rorquals et autres baleines. Ces plis cutanés (au nombre de 12 à 100 selon les espèces de cétacés) s'étendent du menton jusqu'au nombril parfois, et permettent à l'animal d'ouvrir grand la gueule afin d'engouffrer des tonnes d'eau qu'ils filtrent pour se nourrir.

Ces caractères communs correspondent-ils à des traits dérivés (des synapomorphies, en terminologie technique) qui témoigneraient d'une étroite parenté, ou s'agit-il plutôt de simples ressemblances (des homoplasies) ? Notons tout de même que les Glapum'tiens ont quatre membres, à la différence des cétacés ou des siréniens (dugons et lamantins) qui n'en ont que deux. La plupart des mammifères aquatiques ou semi-aquatiques à quatre pattes sont des pinnipèdes (otaries, phoques et morsés), des hippopotames, des loutres et des castors. Les deux derniers sont munis d'une queue robuste, mais la comparaison s'arrête là, car le fait d'avoir quatre pattes et une queue n'est pas forcément un caractère dérivé au sein des mammifères.

La physiologie des Glapum'tiens est également intéressante : ils sont capables de plonger longtemps et assez profond en eau froide, et même d'arpenter la surface d'une planète sans atmosphère ! Or comme tous les mammifères, ils sont munis de poumons. Ces extraterrestres sont donc des champions de la plongée en apnée, comme c'est le cas du grand cachalot dont le record enregistré est une plongée de près deux heures jusqu'à 3 000 mètres de fond !

Un savant mélange de cétacé et de monotrème

Les Glapum'tiens sont donc de surprenants extrémophiles : pour lutter contre le froid de l'espace et des océans, ils ont peut-être une épaisse couche de graisse sous la peau. Et pour économiser leur oxygène, ils ralentissent sans doute leur métabolisme grâce à leur hémoglobine de forme particulière (comme chez les manchots). À moins qu'ils n'aient un taux élevé de myoglobine, autre protéine qui stocke l'oxygène dans le sang (comme chez les cétacés). Disposent-ils également d'un filet capillaire (nommé *retia mirabilia*), qui optimise l'apport en oxygène des organes vitaux (cerveau, cœur ou pattes) comme c'est encore une fois le cas chez les cétacés ou les pinnipèdes ?

Cet extraterrestre est décidément une intéressante chimère qui concentre des traits hérités de plusieurs groupes à la fois ! C'est aussi valable pour sa denture et son régime alimentaire : la grande bouche de Ralph cache

des dents très plates, allongées et identiques en haut et en bas de la mâchoire (les spécialistes parlent d'homodontie). Sur leur planète d'origine, ces dents plutôt broyeuses font des Glapum'tiens des durophages voraces, mangeurs de coquillages, un peu comme les raies actuelles ou les placodontes – reptiles qui vivaient le long des côtes il y a 210 millions d'années environ. Sur Terre, les Glapum'tiens deviennent omnivores : ils apprécient aussi bien les plantes coriaces que le zooplancton. Leurs grosses dents plates doivent donc aussi faire office de filtres, un peu à la manière des fanons des baleines.

Mais si les Glapum'tiens partagent de nombreux caractères avec les cétacés, leur mode de reproduction clôt définitivement le débat : ces mammifères pondent des œufs ! Déposés en eau peu profonde, ils grossissent en même temps que l'embryon. Une fois mature, l'œuf forme une île qui héberge aussi l'adulte. Sur Terre, il existe des mammifères ovipares (ou monotrèmes) : les échidnés et l'ornithorynque. Les premiers évoquent des hérissons munis d'un long museau et d'une queue courte. Ils ne ressemblent donc pas aux Glapum'tiens. En revanche, l'ornithorynque est bien un mammifère amphibie et ovipare, comme Ralph ! Valérien avait raison : il ne suffit pas d'échantillonner un être vivant pour le comprendre, il est indispensable de l'observer dans son milieu naturel. ■

Jean-Sébastien STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. Roland LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay. Marc BOULAY est sculpteur numérique.

ART & SCIENCE

Les errances du jeune Werner

Au musée de Minéralogie de l'École des mines, à Paris, le portrait d'un géologue rend hommage à ses travaux et à ses idées, notamment par la représentation de deux échantillons de roches. L'un d'eux est bien réel et est exposé dans le musée.

Loïc MANGIN

L'École des mines, à Paris, abrite un musée de minéralogie riche de 100 000 échantillons – 4 000 sont exposés – qui constituent un précieux inventaire de la diversité géologique de notre planète. Dans la grande galerie, si d'aventure vous levez les yeux au-dessus des vitrines, votre regard rencontrera celui d'Abraham Gottlob Werner (1749-1817), doctement installé en son tableau (*voir la page ci-contre*). Dans cette toile, plusieurs histoires se superposent : celle de l'œuvre elle-même, celle du personnage et celle des roches représentées.

Le tableau s'inscrit dans une série de portraits d'éminents géologues sollicitée dans les années 1850, sans doute pour décorer une galerie. Outre Werner, les honorés sont Jean-Baptiste Romé de L'Isle, Déodat Gratet de Dolomieu, Ferdinand de Saussure, Balthazar Georges Sage et un autre acteur de nos histoires, René Just Haüy.

Le portrait de Werner, endommagé, a failli être jeté dans les années 1990. Redécouvert en 2012 par Didier Nectoux, le conservateur du musée, sa restauration fut prise en charge par ABC Mines, l'association des Amis de la bibliothèque et des collections du musée de minéralogie. Werner était sauvé ! Mais qui était-il ?

Géologue et minéralogiste renommé, Werner fut professeur à l'École des mines de Freiberg, à l'ouest de l'Allemagne, en Saxe. Il s'illustra par la description de nombreux minéraux et surtout par la défense du nep-

tunisme. Cette théorie stipulait que dans un océan primordial recouvrant la planète, toutes les espèces minérales se seraient formées à partir des sédiments, par précipitation. Puis les eaux se seraient retirées, laissant émerger les continents. On doit aussi à Werner une classification des roches fondée sur leurs propriétés naturelles, telles la dureté.

Le Français Haüy (1743-1822), premier conservateur des collections à l'École des mines de Paris, où il fut professeur, était son grand rival. Ils s'affrontèrent à travers une correspondance pas toujours marquée par l'amabilité. Haüy était un partisan du

Werner et Haüy se sont opposés à travers une correspondance pas toujours marquée par l'amabilité

plutonisme, théorie opposée au neptunisme et selon laquelle la Terre était à sa naissance un immense magma. En outre, il développa lui aussi une classification fondée, elle, sur l'idée de « molécule intégrante », qui préfigurait celle de maille cristallographique, et ce bien avant la mise au point des techniques modernes d'analyse, au XX^e siècle.

Revenons au tableau, que l'on doit à Constant Pellenc. Que voit-on ? Werner, à l'instar de ses collègues également portraiturés, est mis en scène avec des éléments signifiants. Un globe terrestre évoque sans doute le neptunisme (les continents sont

peu marqués). Sur un chevalet, un tableau noir orné d'un schéma en blanc illustre l'idée d'enseignement. Sur la table, vraisemblablement en malachite, on distingue le *Traité des caractères des minéraux*, la traduction française d'un des ouvrages de Werner. Et puis, il y a ces deux cailloux...

L'identification de celui qu'il tient à la main est délicate, faute d'information. Il s'agit probablement d'une fluorine. En revanche, aucun doute n'est permis pour celui posé sur la table, car le vrai échantillon est dans les collections du musée de minéralogie ! C'est une granodiorite (de la famille des granites) traversée de deux filons orthogonaux de feldspaths. Or il s'agit d'une roche plutonique, c'est-à-dire d'origine magmatique. Au départ, un fluide magmatique homogène cristallise et refroidit. Ce faisant, des fissures se forment et se remplissent de fluides résiduels qui cristallisent à leur tour. Ici, le filon le plus étroit est antérieur, car il a été traversé par le plus large, comme en attestent les liserés sombres (*flèches rouges dans la photo*).

Pourquoi ces deux roches ? On peut émettre une hypothèse. L'aspect stratifié de la fluorine, que Werner privilégie en la tenant, symboliserait la sédimentation au cœur du neptunisme, tandis que la roche plutonique est à l'écart. Lors de votre prochaine visite au musée de minéralogie, amusez-vous à analyser les portraits des autres géologues ! ■

Musée de Minéralogie de l'École des mines de Paris : www.musee.mines-paristech.fr/



Abraham Gottlob Werner, distingué géologue allemand, est représenté avec deux morceaux de roche. Ces échantillons illustrent deux théories géologiques qui se sont opposées jusqu'à la fin du XIX^e siècle : le plutonisme, symbolisé par une roche magmatique présentant deux filons de feldspaths croisés, (à droite) et le neptunisme, symbolisé par une roche évoquant la sédimentation (dans sa main).

Complétez votre collection!



Retrouvez tous les numéros depuis 1996 !

Commandez vos numéros sur
www.pourlascience.fr

POUR LA
SCIENCE & ARCHIVES



IDÉES DE PHYSIQUE

Le point de rupture des spaghettis

*Tiges, poutres, tours de cheminées d'usines, spaghettis...
Quand la dynamique s'en mêle, ces divers objets peuvent se casser
de façons assez différentes.*

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Un bâton plié lentement se rompt en deux en son milieu, mais un spaghetti se casse en trois morceaux ou plus. Imaginez maintenant une tour de cheminée d'usine ou une tour en Lego assez haute qui bascule : abandonnée à elle-même dans sa chute, la tour se brisera au tiers environ de sa hauteur. Pourquoi de telles différences ?

Saisissons une barre ou une tige assez rigide : si elle apparaît bien droite quelle que soit son orientation, c'est que son propre poids n'est pas suffisant pour la déformer. On pourra donc négliger ce poids dans la suite. Maintenant, essayons de la plier sur notre cuisse en la plaçant dessus de façon symétrique et en appuyant lentement avec nos mains sur ses extrémités, vers le bas. La barre ploie, se courbe et éventuellement se brise en deux morceaux, bien souvent en son milieu.

Casser en extension ou en compression

Pourquoi au milieu ? Pour des raisons géométriques, il est clair qu'avant la rupture, la partie supérieure de la barre courbée est en extension, tandis que sa partie inférieure est en compression (voir la figure ci-contre). Au sein de l'objet apparaissent donc des contraintes, qui atteignent leur maximum en surface. Au niveau de chaque section de la barre, ces forces de compression et de tension s'annulent. Mais elles créent un couple, le « moment fléchissant », intimement lié à la courbure locale de la barre.

Comment varie ce couple le long de la barre ? Pour le comprendre, il faut faire un bilan de forces. Isolons par la pensée un tronçon de longueur x à partir de son extrémité gauche (voir le schéma ci-dessous) et considérons d'abord la force exercée sur ce tronçon par la main, vers le bas. Le tronçon étant à l'équilibre, la partie restante de la barre doit exercer sur le tronçon une force opposée, vers le haut. Celle-ci ne dépend pas de la longueur x du tronçon, mais on voit alors que le couple formé par les deux forces a un moment proportionnel à x (la distance entre les points d'application de ces forces).

Or ce couple de cisaillement doit être compensé par un couple opposé, le moment fléchissant, exercé sur l'extrémité droite du tronçon par la partie restante de la barre.

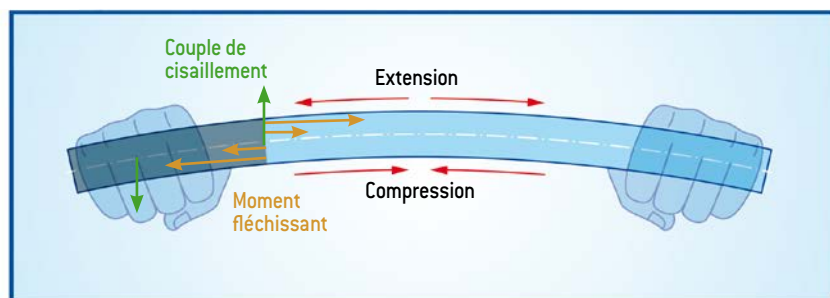
On en déduit que le moment fléchissant croît linéairement depuis l'extrémité, jusqu'au point milieu de la barre.

Ce bilan conduit à deux conclusions. La première, c'est que plus une barre est longue, plus elle se courbe, à force appliquée constante. La seconde est que, comme le moment fléchissant est maximal à mi-longueur de la barre, les forces d'étirement-compression sont également maximales à cet endroit (et elles sont très supérieures aux forces de cisaillement, d'un facteur à peu près égal au rapport de la longueur de la barre sur son épaisseur). C'est donc à mi-longueur que le risque de rupture est le plus important.

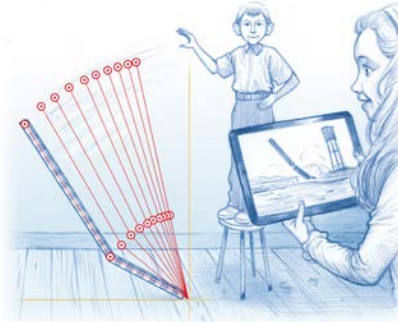
Ce risque de rupture est intimement lié à la résistance du matériau à la traction ou



QUAND ON COURBE UNE TIGE ou une barre en la tenant par ses extrémités, les contraintes sont maximales à mi-longueur et en surface. Selon la nature du matériau, la rupture aura lieu du côté de l'étirement ou du côté de la compression. Le schéma montre aussi le couple de cisaillement et le moment fléchissant qui s'exercent sur un tronçon de la tige.



UNE TOUR HAUTE ET ÉTROITE composée d'éléments dont la cohésion n'est pas trop forte se brise quand elle bascule. Curieusement, le point de rupture se situe au tiers de la hauteur ou un peu plus, ce que des calculs confirment.



réaction du sol, et le bilan des forces et des couples permet de déterminer la dynamique de la chute de la tour.

Isolons une brique par la pensée. Au cours de sa chute, elle va suivre une trajectoire circulaire, tant que la tour conserve son intégrité. Son accélération dépend, comme il se doit, de sa position et de l'accélération angulaire globale de la tour.

Or cette accélération de la brique n'est pas égale à l'accélération qu'elle aurait si elle chutait seule le long d'un arc de cercle. La différence est due à l'existence de contraintes internes, à la fois de compression-extension ou de cisaillement, exercées sur la brique par les éléments qui lui sont adjacents.

LES AUTEURS



Jean-Michel COURT Y et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'université Pierre-et-Marie-Curie, à Paris. Leur blog : www.scilog.fr/idees-de-physique

à la compression. Ainsi, de la craie, du béton ou de l'os résistent très bien à la compression, mais beaucoup moins à la traction. Par conséquent, la rupture se produira sur le dessus (du côté extérieur à la flexion). En revanche, le bois, et en particulier le bois vert, présente une excellente résistance à la traction lorsque celle-ci s'exerce dans le sens des fibres. Mais il éclate en compression : un bâton rompra donc par le dessous (du côté intérieur de la flexion).

Considérons maintenant une barre posée verticalement sur le sol et qui pivote sur son point d'appui. Parfois, elle se brise lors de sa chute, et cela se produit nettement sous son milieu, comme l'illustrent ces photos de cheminées d'usine que l'on détruisait en les inclinant jusqu'à les faire chuter (voir l'illustration ci-dessus). Vous pouvez reproduire l'expérience chez vous en construisant une tour en pièces de Lego, mais attention : pour observer l'effet, il vous faudra jouer les constructeurs de l'extrême et empiler par exemple plus de 150 pièces.

Comment expliquer une telle rupture ? Il faut d'abord remarquer qu'il s'agit d'objets fragiles, qui se briseraient sous l'effet de leur propre poids si on les tenait à l'horizontale, tant les forces qui assurent la cohésion entre leurs composants (le mortier entre les briques, l'emboîtement des pièces de Lego) sont faibles.

Est-ce à dire que seul le poids est à l'œuvre ? Non, il faut aussi compter avec la

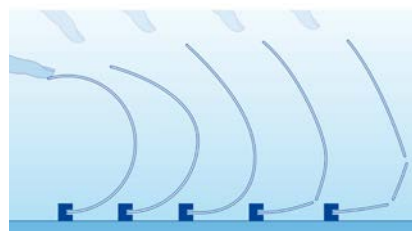
Rupture en cours de chute

Le calcul montre alors que la tour est bien en compression au début de sa chute (quand le poids domine), mais qu'à partir d'environ 45 degrés d'inclinaison, elle se retrouve en extension sous l'effet de la force centrifuge. On trouve que le moment fléchissant maximal se produit au tiers de la hauteur de la tour : c'est donc un point de rupture privilégié.

Un calcul plus détaillé des contraintes d'étirement exercées sur les faces de la tour (là où elles sont maximales) montre que le résultat est robuste pour des tours très hautes, mais aussi que la rupture peut avoir lieu plus haut que le tiers de la hauteur pour des tours moins élancées (mais toujours plus bas que le milieu).

Qu'en est-il du spaghetti, sorte de tour très élancée puisque le rapport entre sa longueur et son épaisseur dépasse 200 ? La rupture de cette étroite tige de pâte sèche est étrange : quand on courbe peu à peu un spaghetti, il se casse invariablement en plus de deux morceaux (voir la figure ci-contre). En quoi se distingue-t-il alors des tiges que nous avons évoquées plus haut ?

Première surprise : le spaghetti semble ne pas s'en distinguer ! En effet, lorsque la pâte est bien homogène et sans défaut, c'est bien au milieu qu'il se brise, là où les contraintes et la courbure sont maximales. Mais la différence apparaît lorsqu'on examine



UN SPAGHETTI FORTEMENT COURBÉ

se casse quand on lâche son extrémité. Le lâcher crée une onde de flexion qui se propage le long du spaghetti et qui augmente localement la courbure (donc les contraintes mécaniques). Le spaghetti se brise là où la courbure dépasse le seuil de résistance. Les nouvelles ondes de flexion ainsi créées conduisent alors à une autre rupture.

ce qui advient ensuite aux deux morceaux, et la seconde surprise est là.

Les physiciens ont longtemps pensé que les extrémités libres de ces morceaux oscillaient, comme la règle que l'on fait vibrer en maintenant l'une de ses extrémités sur la table. Or ce mouvement est assez lent (période de l'ordre de 0,2 seconde) et ne correspond pas du tout aux observations faites avec des caméras ultrarapides par Basile Audoly et Sébastien Neukirch, de l'université Pierre-et-Marie-Curie.

Des ondes de flexion

Juste après la rupture, l'extrémité libre ne subit plus aucune contrainte, alors même qu'elle est fléchie. Les deux physiciens ont établi qu'elle se redresse, mais beaucoup plus rapidement dans l'épaisseur du spa-

ghetti que dans sa longueur. Il s'ensuit l'émission d'une série d'ondes de flexion très particulières. Leur vitesse de propagation le long de la tige diminue avec le temps tandis que, au début, leur amplitude croît. On assiste ainsi à une augmentation de la courbure du spaghetti, et donc de ses contraintes internes, à mesure que ces ondes se propagent.

Comme ces contraintes étaient déjà proches de la contrainte de rupture, une seconde cassure se produit sur chacun des deux morceaux très peu de temps après la première (moins de dix millièmes de seconde). Des ruptures supplémentaires peuvent suivre, compte tenu des réflexions des ondes de flexion sur l'extrémité fixée. Pour éviter une telle explosion de fragments, il faudrait donner de l'épaisseur à nos spaghettis. Mais ce ne seraient alors plus des spaghettis ! ■

■ BIBLIOGRAPHIE

B. Audoly et S. Neukirch, **Fragmentation of rods by cascading cracks: Why spaghetti do not break in half**, *Physical Review Letters*, vol. 95, article 095505, 2005.

G. Varieschi et K. Kamiya, **Toy models for the falling chimney**, *American Journal of Physics*, vol. 71, pp. 1025-1031, 2003.



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






les conférences

Semaine du cerveau

Entrée libre dans la limite des places disponibles

À la Cité des sciences et de l'industrie

cycle Santé en questions

Jeudi 16 mars à 19h

Les pouvoirs de l'esprit ?

La méditation ou l'hypnose aident à combattre le stress, les douleurs chroniques et les addictions.

- Organisé avec l'Inserm
- En duplex avec la Bibliothèque de la Part-Dieu à Lyon.

Au Palais de la découverte

Table ronde

Samedi 18 mars à 15h

Regards croisés sur l'esprit et la pensée

Avec François Ansermet, pédopsychiatre,
Jean-Gaël Barbara, historien des neurosciences,
Elena Pasquinelli, philosophe.

programme complet sur
cite-sciences.fr et palais-decouverte.fr

En partenariat avec





Avec le soutien de

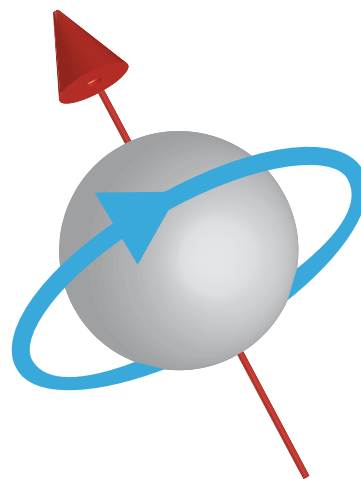



QUESTION AUX EXPERTS

Qu'est donc le spin ?

Le spin est une caractéristique quantique des particules intimement liée à leurs propriétés de rotation. Il joue un rôle essentiel dans les propriétés de la matière.

Jean-Marc LÉVY-LEBLOND



La mécanique classique nous a appris à distinguer dans le mouvement d'un corps deux composantes : d'une part, un mouvement extrinsèque, son déplacement ; d'autre part, un mouvement intrinsèque, sa rotation sur lui-même. Ainsi, pour la Terre, on peut aisément séparer sa révolution annuelle autour du Soleil de sa rotation quotidienne sur elle-même. À chacun de ces mouvements du corps considéré est associée une grandeur cinématique spécifique : pour son déplacement, la quantité de mouvement, et pour sa rotation, le moment cinétique (ou angulaire) propre. Il s'agit d'une grandeur vectorielle dont la direction est celle de l'axe de rotation et dont la valeur est proportionnelle à la vitesse angulaire de rotation.

La théorie quantique amende les notions newtoniennes de position et de vitesse, donc l'idée même de mouvement. Elle conserve cependant leur pertinence aux grandeurs physiques fondamentales – tout en complexifiant leur formalisation mathématique. Ainsi, un objet quantique, ou « quanton », est doté d'un moment cinétique propre, qui traduit ses propriétés rotationnelles, même s'il s'agit d'une notion plus abstraite et moins imagée qu'un mouvement de rotation classique.

Mise en évidence au cours des années 1920 pour l'électron, cette grandeur a reçu en anglais la dénomination de spin, exprimant le tournoiement et provenant de la désignation anglaise de la quenouille d'une fileuse au rouet. Ce mot provient en fait du

latin *spina*, « épine », en raison de la forme de la quenouille. Il est dommage qu'aucun équivalent français n'ait été proposé. Les possibilités ne manquaient pourtant pas : le tournis, la volte ou la pirouette de l'électron... Voilà qui aurait eu du charme !

La nature quantique du spin se manifeste par la discontinuité de ses valeurs numériques possibles : elles sont « quantifiées ». Concrètement, les valeurs du spin ne peuvent être que des multiples entiers ou demi-entiers de \hbar , la constante réduite de Planck, égale à $h/(2\pi)$ où h est la constante de Planck. La valeur du spin de l'électron est ainsi $\hbar/2$; on dit en général que son spin vaut $1/2$, en sous-entendant l'unité \hbar . Les protons et les neutrons ont aussi un spin $1/2$, le photon un spin 1 , les mésons π un spin 0 , etc.

Les orientations du spin aussi sont quantifiées : il ne peut en exister que $2s + 1$ pour un spin s ; ainsi, le spin de l'électron ne peut prendre que $2 \times 1/2 + 1 = 2$ orientations.

Fermions et bosons

La caractéristique la plus importante du spin est son lien avec le comportement des ensembles de quantons de même nature. Ceux de spin demi-entier ne peuvent jamais coexister dans des états physiques individuels identiques ; on les nomme fermions. De mêmes quantons de spin entier, eux, peuvent s'accumuler dans des états identiques ; on les nomme bosons. Ces propriétés des systèmes de quantons régissent leurs

comportements collectifs et expliquent par exemple aussi bien la structure des cortèges électroniques des atomes (reflétée dans le tableau de Mendeleïev) que l'impénétrabilité de la matière solide, la conductivité électrique des métaux, la lumière laser, etc. On peut démontrer cette relation entre spin et comportement collectif à partir des principes fondamentaux de la théorie quantique et de la théorie de la relativité. Toutefois, la preuve est si complexe que les raisons profondes de cette connexion restent peu intuitives.

Comme en mécanique newtonienne, l'existence d'un moment cinétique intrinsèque permet aux particules ayant des interactions électromagnétiques de porter un moment magnétique, ce qui les rend similaires à de petits aimants. Cette propriété est à l'origine d'importantes techniques modernes, notamment la résonance magnétique nucléaire, ou RMN. Dans un champ magnétique, les niveaux d'énergie des noyaux atomiques dépendent de l'orientation de leur spin. En détectant l'absorption d'un rayonnement électromagnétique induisant une transition entre ces niveaux, à une fréquence qui dépend spécifiquement des noyaux concernés, on peut observer de façon très fine la répartition des atomes. C'est là le principe de l'imagerie par résonance magnétique (IRM), une technique d'imagerie médicale très utilisée, notamment parce qu'elle est non invasive et non irradiante. ■

Jean-Marc LÉVY-LEBLOND est professeur émérite de physique à l'université de Nice.

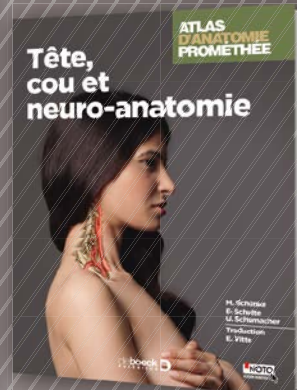
Tout le corps humain en 3 volumes

ATLAS D'ANATOMIE PROMÉTÉE

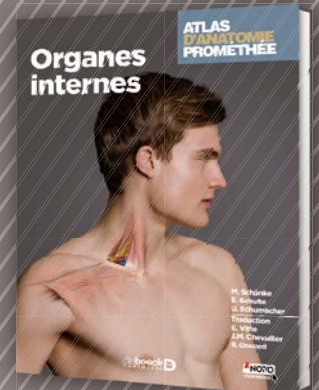
9782804185527 - 640 PAGES - 89 €



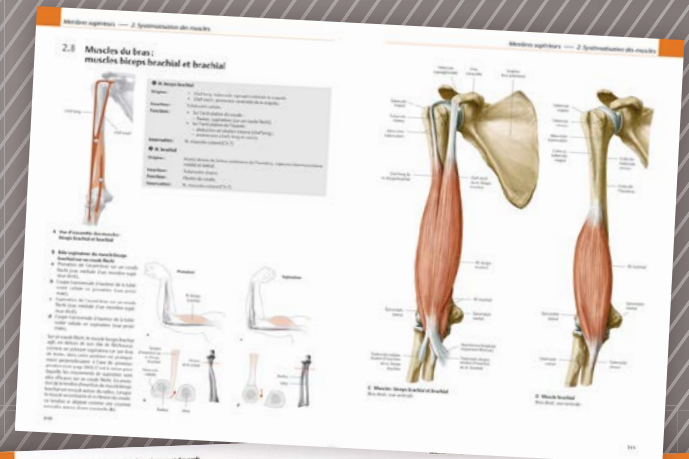
DÉCOUVREZ ÉGALEMENT :



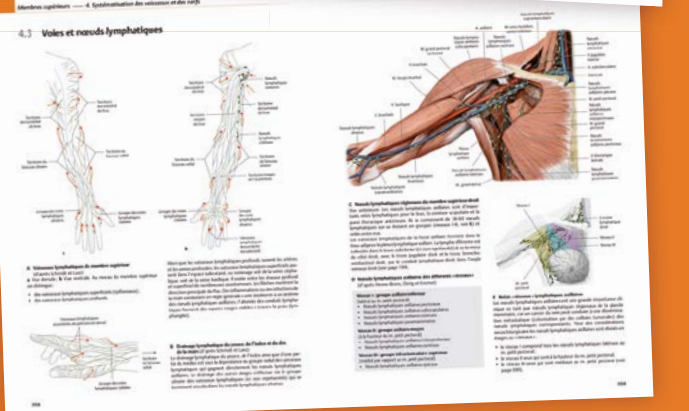
9782804186159 - 560 PAGES - 89 €



9782804182984 - 520 PAGES - 89 €



- Plus de **170 tableaux** par titre
- Près de **1800 illustrations** dans chaque tome
- Des **centaines d'exemples cliniques illustrés**
- Chaque sujet est exposé sur une **double page**, pour une **approche complète et rapide**, en un seul coup d'œil
- Des **images par ordinateur** hautes en couleur, d'une précision exceptionnelle, hyperréalistes



SCIENCE & GASTRONOMIE

Jeux de gels

Le choix de la température de fusion des gels culinaires conditionne les consistances des mets et la libération de molécules odorantes.

Hervé THIS

La bouche, comme les autres systèmes sensoriels, cherche des contrastes : de consistance, de couleur, de saveur, de piquant ou de frais. Rien n'a moins d'intérêt culinaire qu'une préparation où chaque bouchée ressemble à la suivante. Au contraire, chaque modalité de la sensation du goût augmente l'intérêt d'un plat, ce qu'ont bien compris les pâtisseries avec leurs gâteaux multicouches.

Contraste de consistance ? Les aliments étant principalement des « gels », c'est leur structure que nous envisagerons en premier. Ceux dont la gélatine est le composé gélifiant ont des vertus gourmandes, car ils fondent dans la bouche, ce qui est un contraste dynamique. Toutefois, on peut également envisager que le gel soit un « dynagel », c'est-à-dire un gel qui se forme en même temps qu'il se déforme [H. This, « Statgels et dynagels », *N3AF*, vol. 1, pp. 1-12, 2017] et la compréhension de sa structure donne des idées supplémentaires de cuisine.

Qu'elle provienne du poisson ou de la viande, la gélatine est faite de tissu collagénique partiellement dégradé par son extraction. Dans les tissus animaux, le tissu collagénique entoure les cellules, notamment les cellules musculaires, et il sert à réunir ces cellules en faisceaux, en faisceaux de faisceaux, et ainsi de suite jusqu'à la formation des muscles. Lors de l'extraction de la gélatine, chez soi par cuisson de viande dans de l'eau, le tissu se désorganise : les molécules de collagène, formées de trois brins protéiques associés en hélice, se débloquent et une hydrolyse partielle de chaque brin a lieu.

Dans l'eau, quand la température est supérieure à celle de l'organisme animal, les molécules de gélatine forment donc une solution homogène, l'agitation thermique empêchant les associations entre brins. Mais aux températures inférieures, les solutions gélifient, les brins de gélatine ayant tendance à se réassocier par des liaisons faibles de Van der Waals et des liaisons hydrogène (entre atomes d'hydrogène et d'oxygène appartenant à des molécules voisines).

Gélatine solide et liquide

Plus précisément, les extrémités des brins de gélatine se joignent et donnent ainsi naissance à un réseau tridimensionnel de gélatine, au sein duquel l'eau est piégée. Pour chaque brin, une extrémité est libre ou liée, la proportion de chacune de ces configurations étant inversement proportionnelle à l'exponentielle de son énergie de formation. Ce caractère exponentiel fait que, selon la température, les brins sont soit quasiment tous liés, soit quasiment tous libres : la transition est brusque.

Aux températures de transition, on peut avoir des états du gel où la proportion de brins liés est suffisante pour stabiliser un réseau de gélatine tridimensionnel, tandis que certains brins sont détachés, en solution. Des composés sapides ou odorants, en solution dans la phase aqueuse, interagissent alors avec les brins libres, ces composés modifiant leur diffusion en augmentant la viscosité de la phase aqueuse. Quel cuisinier utilisera ces « dynagels », en cuisine ?



© Jean-Michel Thiriet

Par ailleurs, en bouche, certains gels de gélatine peuvent fondre : selon les tissus collagéniques à partir desquels on a produit la gélatine (poisson, porc, bœuf, etc.), on obtient des gélifiants dont la température de gélification (et de fusion) avoisine la température de la bouche. Autrement dit, le choix de l'origine de la gélatine est essentiel. Sans compter que les cuisiniers peuvent renforcer les gels de gélatine à l'aide d'enzymes, telle la transglutaminase, qui engendrent la formation de liaisons chimiques covalentes, bien plus résistantes.

Finalement, il n'y a aucune raison de penser que les gelées de gélatine soient dépourvues d'intérêt gustatif : avec une double dynamique, interne et de fusion, les cuisiniers ont des outils pour produire des bavarois, aspics, crèmes prises, aux goûts sur mesure (ce sont les composés solubilisés dans la phase aqueuse des gels). Qui plus est, on peut organiser des structurations des gels produits, mais c'est là un autre chapitre de l'histoire extraordinaire des gels en cuisine. ■



Hervé THIS, physicochimiste, 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

OFFRE DÉCOUVERTE

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE



1 AN - 12 N^{OS}
59€ **24%**
d'économie

2 ANS - 24 N^{OS}
110€ **29%**
d'économie

3 ANS - 36 N^{OS}
159€ **32%**
d'économie

BULLETIN D'ABONNEMENT

POUR LA SCIENCE

À renvoyer accompagné de votre règlement à : Pour la Science - Service abonnements - 19 rue de l'industrie - BP 90 053 - 67 402 Illkirch cedex

OUI, je m'abonne à Pour la Science en formule Découverte :

- 1 an • 12 numéros • **59€** au lieu de ~~18,50€~~ (D1A59E)
- 2 ans • 24 numéros • **110€** au lieu de ~~157€~~ (D2A110E)
- 3 ans • 36 numéros • **159€** au lieu de ~~235,50€~~ (D3A159E)

MES COORDONNÉES

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____

Ville : _____

Tél. : _____

Pour le suivi client (facultatif)

MON MODE DE RÈGLEMENT

Par chèque à l'ordre de Pour la Science

Par carte bancaire

N° _____

Date d'expiration _____ Clé _____

Signature obligatoire



PAS473B

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

Grâce à votre email nous pourrions vous contacter si besoin pour le suivi de votre abonnement. À réception de votre bulletin, comptez 5 semaines pour recevoir votre n° d'abonné. Passé ce délai, merci d'en faire la demande à pourlascience@abopress.fr

J'accepte de recevoir les informations de Pour la Science OUI NON et de ses partenaires OUI NON

Délai de livraison: dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31/03/2017 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site www.pourlascience.fr. Conformément à la loi "Informatique et libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à Pour la Science.

■ ÉTHOLOGIE

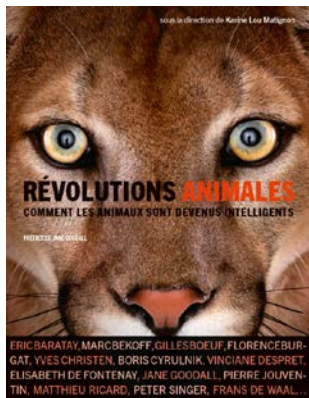
Révolutions animales

Karine Lou Matignon (dir.)

Les Liens qui Libèrent, 2016
[576 pages, 38 euros].

Le titre de ce livre peu commun intrigue au premier abord. On se demande s'il est question des capacités des animaux, si l'ouvrage montre leurs compétences et à quel point ils peuvent être... « humains ». C'est là que se loge la surprise, car cette œuvre collective embrasse beaucoup plus, non seulement à travers la diversité des thèmes traités, mais surtout dans les pensées suscitées.

Ce volume dense traite surtout de l'idée que nous nous faisons des animaux et de la façon dont elle s'est complexifiée avec le temps. Quelle réussite sur ce point !



De nombreux contributeurs – plus de soixante-dix, dont Matthieu Ricard, Boris Cyrulnik, Jane Goodall, Pierre Jouventin – donnent des points de vue divers sur des sujets qui sont aussi très variés. Il est plus que probable que vous ne partagerez pas l'avis de tous les auteurs, mais c'est justement là l'intérêt de cette synthèse, qui vous montrera toutes les facettes des relations de l'homme à l'animal. Si, d'un point de vue biologique, la plupart des gens admettent aujourd'hui que les humains sont des animaux comme les autres, ils continuent

à les considérer comme... différents. Indiscutablement, nous sommes bien les seuls à faire des livres pour traiter, par exemple, des... animaux ! Justement, la question de nos relations aux animaux se pose. Sommes-nous vraiment des animaux « différents », en un mot des « humains », alors que nous échouons lourdement à établir des relations réellement éthiques, responsables, humaines avec les animaux ? Il faut y réfléchir !

Antoine Balzeau
MNHN, Paris

■ CRYPTOZOOLOGIE

Du yéti au calmar géant

Benoît Grison

Delachaux & Niestlé, 2016
[400 pages, 39 euros].

La cryptozoologie, la « science des animaux cachés », suscite des réactions pour le moins contrastées. Certains méprisent et rejettent ce qu'ils considèrent comme une pseudoscience, alors que d'autres s'enthousiasment jusqu'au délire pour le yéti ou le monstre du Loch Ness. Autant dire qu'il n'est pas simple de présenter un aperçu objectif et équilibré de ce que l'on peut considérer, dans le meilleur des cas, comme une approche particulière de la zoologie, qui fait la part belle aux témoignages et aux indices dans le but de donner une existence scientifique à des créatures dont l'existence réelle n'est pas (encore) attestée. C'est pourtant ce que réussit l'auteur de ce remarquable livre.

Il y passe en revue le bestiaire de la cryptozoologie, traitant aussi bien des grands dossiers dont les médias se font volontiers l'écho, du grand serpent de mer au bigfoot et au mokélé-mbembé (le prétendu

dinosaure des marais africains), que de cas moins célèbres mais tout aussi fascinants, tel l'« oiseau de Gauguin », mystérieux volatile des Marquises représenté sur une toile du célèbre peintre.

L'auteur fait preuve d'une érudition impressionnante, discutant avec autant de compétence des mœurs du calmar géant, de l'anatomie de l'homme de Florès que de l'hydrographie des lacs écossais. Surtout, il sait faire la part des choses, être sceptique quand



il le faut, mais ouvert à des hypothèses parfois audacieuses quand les données disponibles le justifient. En matière de cryptozoologie, récits et témoignages jouent un rôle capital, et Benoît Grison a le mérite de savoir peser les facteurs qui influent sur ce que nous racontent tant les savoirs traditionnels que les témoins de phénomènes à première vue déconcertants.

Le résultat est un panorama des « bêtes ignorées », pour reprendre le terme de Bernard Heuvelmans, « père de la cryptozoologie », qui ne sombre ni dans la crédulité où semblent se complaire certains enthousiastes, ni dans le mépris professé par certains scientifiques assis sur leurs certitudes. On a ainsi un ouvrage passionnant qui, du fait de ses superbes illustrations, est aussi un très beau livre.

Eric Buffetaut
CNRS-ENS, Paris

■ ESPACE

Pollution spatiale : l'état d'urgence

Christophe Bonnal

Belin, 2016
[240 pages, 19,90 euros].

Résumons le problème, tel que le voit l'auteur, expert à la division des lanceurs au Cnes: chaque semaine, il rentre dans l'atmosphère au moins un satellite ou un étage de lanceur. De 10 à 40 % de cette masse touchera la surface du globe au hasard. Voilà pourquoi un certain état d'urgence règne ! Ce livre est là pour nous y sensibiliser.

Lentement, mais sûrement, le nombre des objets gravitant au-dessus de nos têtes devient critique. Cet encombrement orbital obère déjà nos possibilités d'envoyer dans l'espace davantage de satellites utiles. Les collisions se font plus fréquentes, et elles amorcent de véritables réactions en chaîne, en multipliant les fragments en vol. Si les gros objets sont gênants à cause de leur masse, les petits le sont en raison de leur nombre. Et tous sont si véloces que même un objet millimétrique est menaçant.

Christophe Bonnal rappelle que les experts du spatial ont perçu le problème depuis longtemps. Ils ont préconisé de concevoir les satellites en prévoyant d'emblée leurs fins de vie, que ce soit par destruction contrôlée dans l'atmosphère ou en garant les objets géostationnaires sur une orbite-cimetière. Toutefois, leurs préconisations ne sont pas toujours respectées, tandis que l'on peine à faire émerger un cadre juridique contraignant, à même de punir ceux qui abusent.

Certes la concertation et la coopération entre les différentes agences spatiales internationales et les opérateurs privés progressent,

mais la réalité est que nous avons toujours une... fusée de retard.

Il s'agit aussi de surveiller l'espace au moyen de télescopes, de radars, de lasers... L'ouvrage détaille et illustre toutes les techniques d'observation complémentaires. Côté américain, par exemple, cela donne le catalogue *Two-line element set* qui, comme son nom l'indique, contient sous une forme



standardisée de deux lignes tous les paramètres orbitaux nécessaires pour suivre la trajectoire d'un objet satellisé.

Grâce à de tels catalogues, il est possible d'anticiper les collisions et de prévoir des manœuvres d'évitement. À cette étape, il s'agit avant tout de s'assurer que le remède n'est pas pire que le mal: dans le livre, de petits calculs de physiciens à faire sur un coin de table clarifient les différentes approches ainsi que les principaux écueils de façon simple et ludique. Dans la réalité, les choses sont autrement plus compliquées et les enjeux de taille, puisque, par exemple, le fonctionnement des systèmes de géolocalisation GPS et Galileo pourrait vite s'interrompre à la suite de multiples collisions.

En fait, la surpopulation sur les orbites utiles devient telle que l'on ne peut plus se contenter de ces mesures de prévention, de suivi et de manœuvres pour désencombrer les orbites basses. Il s'agit aussi

d'aller faire du ménage dans les orbites utiles. Si les techniques de lancement sont éprouvées, nous manquons encore de d'expérience dans le nettoyage de portions d'espace. Voilà, du reste, un domaine en plein essor, où les esprits les plus inventifs rivalisent de propositions adaptées aux différentes situations et aux différents types d'orbites: câbles, épaulements, voiles, destruction par balles, soufflage ionique, laser... Certaines sont déjà plus ou moins validées techniquement, d'autres ne sont encore que théoriques et peut-être irréalisables. Toutes traduisent des trésors d'ingéniosité, et les découvrir sous la plume de Christophe Bonnal est un plaisir délectable. Éboueur de l'espace, voilà une nouvelle profession somme toute très glamour!

Christophe Pichon

Institut d'astrophysique de Paris

■ ASTROPHYSIQUE

Les Trous noirs

Matteo Smerlak

PUF, 2016
(128 pages, 9 euros).

Élégamment et clairement écrit, ce « Que sais-je ? » sur les trous noirs se dévore. Le petit format n'obère en rien la qualité du contenu, mais nous livre au contraire le condensé d'informations récentes nécessaire pour prendre toute la mesure de l'importance de la détection récente d'ondes gravitationnelles issues de la coalescence de deux de ces objets hors normes.

Matteo Smerlak y aborde avec le suspense d'un thriller, mais aussi avec une belle pédagogie,



les trous noirs, ces entités mystérieuses et singulières qui fascinent autant le cinéma que les meilleurs scientifiques depuis Laplace et John Michell. Comment identifier un trou noir, estimer sa masse, prédire son évolution? Peut-on en créer en laboratoire? Quelles sont les implications théoriques et philosophiques de son existence? Peut-on voyager dans le temps grâce à eux? L'auteur répond à ces questions en démontrant un réel respect pour l'intelligence de ses lecteurs et nous emmène vers une bonne compréhension physique de ces objets. Chaque thème est abordé avec simplicité et concision. Il nous place ainsi au cœur des défis modernes de la physique des trous noirs, depuis la découverte des premiers candidats, jusqu'à leur formation puis leur évaporation, en passant par le paradigme de la membrane et de la singularité centrale, l'absence de « cheveux », sans oublier les trous sourds et les capes d'invisibilité.

Christophe Pichon

Institut d'astrophysique de Paris

Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur www.pourlascience.fr



Mars Horizon

Florence Porcel
et Erwann Surcouf

Delcourt, 2017
(120 pages, 16,50 euros).

2080. La première mission habitée débarque sur Mars, tandis que des robots forent la glace d'Europe, le satellite de Jupiter, à la recherche de traces de vie. À travers le quotidien des spationautes embarqués dans ces aventures, cette bande dessinée documentée donne à voir un futur qui paraît tout d'un coup plus accessible. Et invite à réfléchir tant sur notre place dans le cosmos qu'à notre gestion des ressources.



Le Beau Livre de la Préhistoire

Marc Azéma, Laurent Brasier

Dunod, 2017
(420 pages, 27 euros).

Préfacé par le grand néolithicien Jean Guilaine, ce très beau livre résulte des compétences de pointe d'un préhistorien et de la vision d'ensemble d'un journaliste scientifique. Les deux auteurs passent en revue avec une grande rigueur les grandes découvertes de la science préhistorique. Des illustrations aussi pertinentes que belles renforcent l'intérêt du traitement de chaque thème; sans qu'on le remarque, l'ensemble des billets présentés enseigne l'essentiel de ce que furent les hommes préhistoriques. À mettre entre toutes les mains.



Les Mondes perdus

E. Baus, B. Loyer,
Mary Sterb et J.-S. Steyer

Glénat, 2017
(176 pages, 30 euros).

Sur la base des images de la série documentaire *Les mondes perdus* (Saint-Thomas Production/Arte), les principales formes animales terrestres des 500 derniers millions d'années sont efficacement présentées par deux paléontologues et mises en situation de vie par deux cinéastes. On se familiarise ainsi avec les faits et les idées qui ont conduit à la restitution des grandes étapes évolutives de la vie animale terrestre. Cet ouvrage intéressant pour les adultes est parfait pour les enfants passionnés de science.

L'INSAISSABLE UNIVERSEL

En sciences, l'universel semble évident : deux et deux font quatre partout, les pierres tombent partout. Il faut une réflexion subtile pour percevoir en quoi notre façon d'exprimer et de comprendre que deux et deux font quatre et que les pierres tombent n'est pas universelle.

Dans le domaine langagier, l'universel est un postulat dont on n'est jamais très sûr. Il faut bien que, sous-jacent à toutes les langues, existe quelque chose d'universel grâce à quoi on peut traduire d'une langue à une autre. Mais cet universel est inaccessible, puisqu'aucune traduction n'est parfaite. Peut-être même, après tout, n'existe-t-il pas : il y a de l'intraduisible. Ainsi, le dictionnaire Robert & Collins « traduit » l'anglais *he is a perfect gentleman* par le français « c'est un vrai gentleman », et les mots français « camembert » et « roquefort » par les mots anglais *Camembert* et *Roquefort* [savourons les majuscules] !



Des sciences aux questions langagières, la notion d'universel prend des allures si différentes qu'on peut se demander ce qu'elle-même a d'universel.

UN CIMENT SOCIAL MODERNE

Même si l'on n'a aucun goût pour cela, on doit résoudre des problèmes posés par la technologie : s'accoutumer à un objet nouveau, restaurer la boîte mail piratée, apprendre des termes destinés à disparaître avant qu'on les ait vraiment maîtrisés... En outre, on doit sacrifier du temps à la bureaucratie. D'autant plus

que les administrations et les entreprises se sont emparées de la technologie pour contraindre l'utilisateur à travailler à leur place : à lui de télécharger sa feuille d'impôt et les divers formulaires qu'il lui faut remplir.



Excédé, on rêve d'une société où nul ne serait encombré par des impératifs qui ne lui apportent rien... Hélas, ce rêve tournerait au cauchemar. La spécialisation, qui tient déjà trop de place dans notre société, la prendrait carrément toute, puisque chacun resterait plongé dans son domaine favori sans jamais être forcé d'en sortir. Alors, de quoi parlerions-nous les uns avec les autres ? De rien. Nous ne partagerions aucun sujet d'intérêt. Nous formerions une juxtaposition d'autistes.

Avoir des ennemis communs, voilà qui permet de faire société. Pour entamer une conversation, plutôt que parler du temps, lançons : « Vous avez vu la note d'information interministérielle DGS/VSS2/DGCS/DGT/2016/326 qu'ils ont encore pondue ? Décidément, ils ne savent plus quoi inventer pour nous pourrir la vie. » Suite à quoi, nous nous ferons une joie de déblatérer à qui mieux mieux contre les contrariétés en tous genres que nous causent technologie et bureaucratie.

LE SAVOIR ORIENTE-T-IL ?

En classe, les enseignants doivent faire semblant de croire que le savoir aide à résoudre les problèmes qui se posent dans la vie. S'ils laissent entendre le contraire, les élèves ne seront guère incités à étudier...

Or le savoir ne fait pas diminuer l'incertitude. En acquérir suscite des questions nouvelles et, souvent, ne dissipe pas la perplexité, mais la déplace, voire l'augmente. Compter sur le

savoir pour s'orienter va à l'encontre d'une leçon que donne son histoire : le savoir est mouvant, toujours susceptible d'être réfuté. Il hésite même quant aux processus qui jouent en nous lorsque nous effectuons des choix, puisque la notion de libre arbitre continue de diviser les savants. Ce que recouvre le mot *choisir* échappe donc au savoir. Que ce dernier puisse aider à choisir serait alors paradoxal.

Le métier d'universitaire consiste à enseigner, donc à faire comme si le savoir donnait des boussoles, et à chercher, donc à constater que celles-ci peuvent tromper. Que cette dualité soit favorable et à l'enseignement et à la recherche est un dogme. Risquons l'hérésie : il ne va pas de soi que demander aux universitaires d'illustrer deux conceptions divergentes du savoir soit avisé.

SANS NUANCE, AVEC IGNORANCE

Le débat sur la peine de mort ne permet nulle position intermédiaire. Être contre « à l'exception des crimes les plus odieux », c'est être pour, puisque cela revient à ne pas en rejeter le principe. Une société a-t-elle ou non le droit de tuer de sang-froid ? Nous ne disposons d'aucun élément objectif pour décider. Nous ignorons ce qui est donné quand on « donne » la mort. Nous ne savons pas non plus ce qui est ôté quand on ôte la vie : nous ignorons ce que le condamné aurait fait de la sienne. Pourtant, nous avons tous une position sans nuance. Être mollement pour la peine de mort, ou vaguement contre, serait indécent.

L'art de présenter les choses...



Sur la plupart des débats, nous sommes submergés d'informations. Notre opinion est susceptible de varier si des éléments nouveaux nous arrivent. Le débat sur lequel nous avons la conviction la plus ferme est celui sur lequel nous en savons le moins. ■

Participez à la 2nde édition du concours international

THE COSMETIC VICTORIES

BY THE ENDOWMENT FUND COSMETIC VALLEY/ESSEC

PRESENTEZ VOTRE PROJET INNOVANT

Les projets seront sélectionnés par un jury prestigieux, composé d'experts et des représentants des plus grandes maisons de la filière parfumerie-cosmétique.

- **Prix de la recherche**, dédié aux étudiants, postdoctorants et chercheurs publics.
- **Prix de l'innovation**, dédié aux porteurs de projets, aux start-ups et PME.



DEADLINE

30 Mars 2017



DOTATION

20 000 €

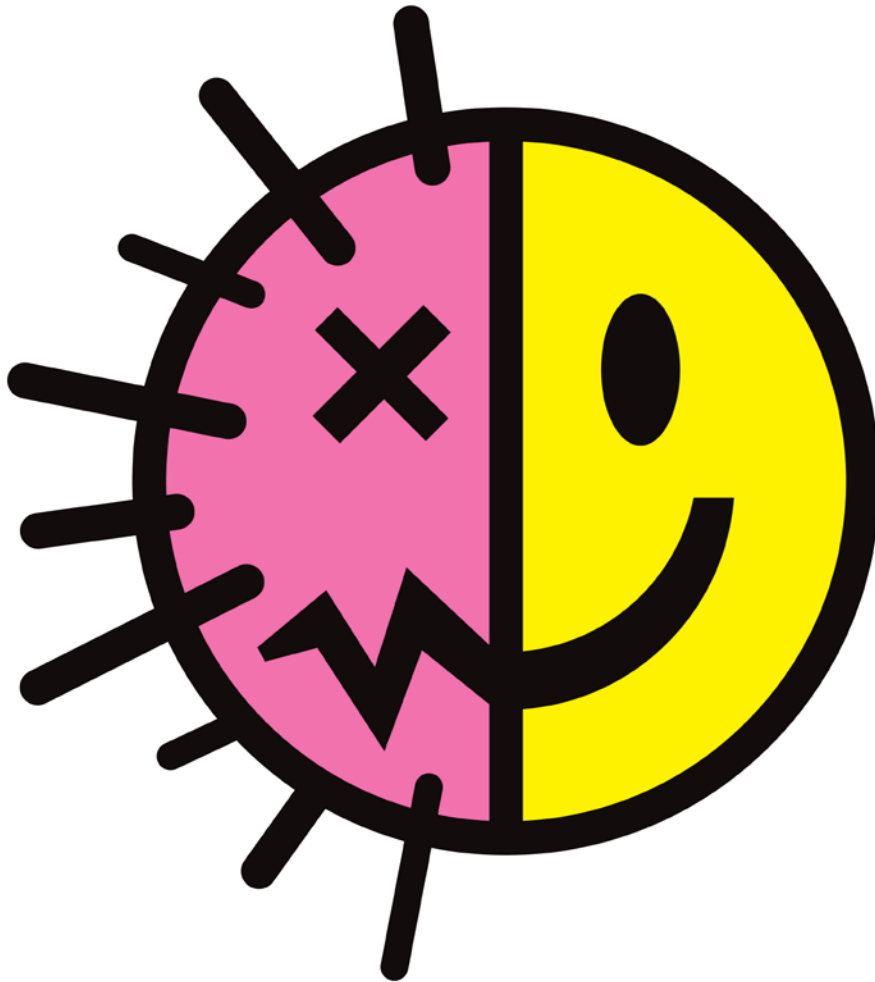
Inscription sur www.thecosmeticvictories.com

Informations complémentaires : Emmanuel Laheux
Tél. : +33 (0)2 37 211 211 - E-mail : elaheux@cosmetic-valley.com

#Cviral



80 ans
Palais



DESIGNER IN VENICE

Du microbe au fou rire, tout s'attrape

VIRAL

Exposition > 18.10.16 > 27.08.17

M Champs-Élysées Clemenceau **M** Franklin Roosevelt

EN CO-PRODUCTION AVEC

PAVILHÃO DO
CONHECIMENTO
CIÊNCIA VIVA



EN PARTENARIAT AVEC

Direct Matin SCIENCE avec le financement de Télérama Society en partenariat avec SO FOOT franceinfo:

