PHYSIQUE DES PARTICULES
La supersymétrie, théorie en crise ?

ARCHÉOLOGIE
L'apprentissage du cunéiforme

PHILOSOPHIE DES SCIENCES
Des corrélations à la causalité

POUR LA SCIENCE

Juin 2014 - n° 440

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

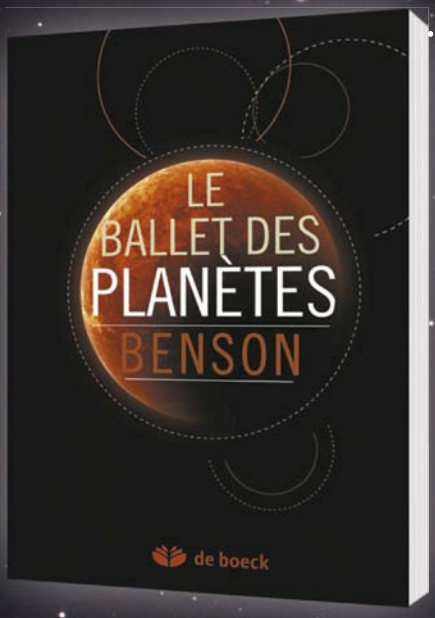
Réinventer le vivant

Quels enjeux pour la biologie de synthèse ?

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

M 02687 - 440 - F: 6,20 € - RD

Plaisir des sciences



Le ballet des planètes

De l'élégance mathématique des orbes planétaires

Donald Benson

Traduction de Benoît Clenet

Cet ouvrage décrit la compréhension du mouvement des planètes sous son aspect historique, illustre pourquoi la méthode scientifique a porté ses fruits dans le passé et comment elle fonctionne dorénavant.

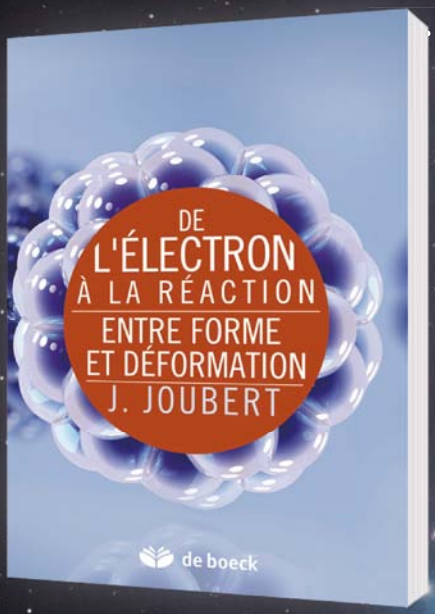
Édition 2014 • 17 € • 200 p.

Dessine-moi l'Univers

Cédric Millot, Julien Vandermarlière

Comment les hommes se sont-ils représenté l'Univers à travers les âges ? Ce livre expose de façon simple et claire les mécanismes qui ont permis à la pensée scientifique de naître et d'évoluer de l'Antiquité à nos jours.

Édition 2013 • 15 € • 104 p.



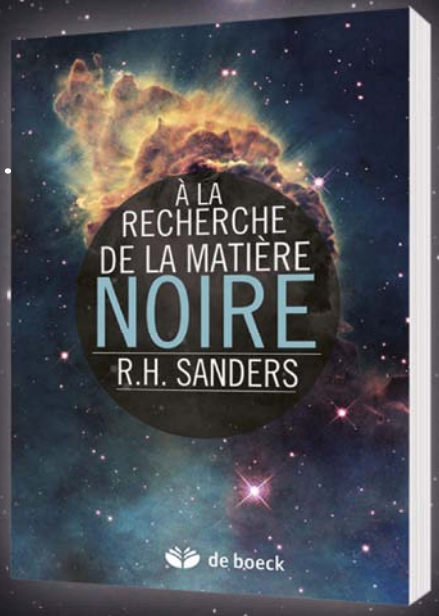
De l'électron à la réaction

Entre forme et déformation

Jérôme Joubert

L'esthétique de la chimie quantique est ici abordée dans une approche qualitative des structures et des phénomènes qui régissent tant notre environnement immédiat que l'autre bout de l'Univers.

Édition 2013 • 29 € • 150 p.



À la recherche de la matière noire

Histoire d'une découverte fondamentale

Robert H. Sanders

Traduction de Benoît Clenet

La matière noire permet de trouver une explication à une multitude d'observations astronomiques. Comment et pourquoi cette forme mystérieuse de matière dans l'Univers s'est-elle imposée jusqu'à devenir le paradigme majeur de l'astrophysique ?

Édition 2012 • 22,50 € • 230 p.

En librairie et sur www.deboeck.fr

de boeck

POUR LA SCIENCE

www.pourlascience.fr

8, rue Férou - 75278 Paris cedex 06

Groupe POUR LA SCIENCE
Directrice de la rédaction : Françoise Pétry
Pour la Science
Rédacteur en chef : Maurice Mashaal
Rédactrice en chef adjointe : Marie-Neige Cordonnier
Rédacteurs : François Savatier, Philippe Ribeau-Gésippe, Guillaume Jacquemont, Sean Bailly
Dossier Pour la Science
Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin
Cerveau & Psycho
Rédactrice en chef : Françoise Pétry
Rédacteur : Sébastien Bohler
L'Essentiel Cerveau & Psycho
Rédactrice en chef adjointe : Bénédicte Salthun-Lassalle
Développement numérique : Philippe Ribeau-Gésippe
Directrice artistique : Céline Lapert
Secrétariat de rédaction/Maquette : Sylvie Sobelman, Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy, Caroline Vanhoove
Marketing : Élise Abib et Ophélie Maillet
Direction financière et direction du personnel : Marc Laumet
Fabrication : Marianne Sigogne, assistée d'Olivier Lacam
Presse et communication : Susan Mackie
Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé
Conseillers scientifiques : Philippe Boulanger et Hervé This
Ont également participé à ce numéro :
Jean-Philippe Beaulieu, Luca Casacci, Jean-Louis Dufresne, Eitan Haddock, Cécile Michel, Yvan Pandelé, Christophe Pichon

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

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

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

DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE
Contact kiosques : À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet
Tel : 04 88 15 12 41
Canada : Edipresse : 945, avenue Beaumont, Montréal, Québec, H3N 1W3 Canada.
Suisse : Servidis : Chemin des châlets, 1979 Chavannes - 2 - Bogis
Belgique : La Caravelle : 303, rue du Pré-aux-oies - 1130 Bruxelles.
Autres pays : Éditions Belin : 8, rue Férou - 75278 Paris Cedex 06.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor in chief : Mariette DiChristina. Editors : Fred Guterl, Ricky Rusting, Philip Yam, Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong. President : Steven Inchcoombe. Executive Vice President : Michael Florek.

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

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

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

OJD PRESSE PAYANTE Diffusion Certifiée 2013

Recherche de traces

Une trace est la présence d'une absence, elle révèle ce qui n'est plus. Certaines, laissées sur le sable ou la terre meuble, sont fugaces. D'autres ont traversé le temps, telles celles, fossilisées, d'animaux disparus. La pierre est souvent dépositaire des traces du passé. L'argile également. C'est le cas des tablettes cunéiformes gravées il y a quelque 5 000 ans. Les scribes de Mésopotamie écrivaient sur l'argile fraîche au moyen d'un roseau taillé, et l'étude des « brouillons » de tablettes révèle aujourd'hui comment se faisait l'apprentissage de ce système d'écriture, voire comment se prononçaient les langues transcrites en cunéiforme *(voir L'apprentissage du cunéiforme, page 48)*.

Généralement, les scientifiques disposent de traces qu'ils interprètent à l'aune des données acquises par ailleurs. Parfois, ils adoptent la démarche inverse, traquant les traces qui leur permettraient de valider une hypothèse. C'est ce que font les physiciens à la recherche de preuves de la supersymétrie, théorie proposée il y a plus de 40 ans pour dépasser le modèle standard de la physique des particules. Les physiciens du CERN, à Genève, sont à

La biologie de synthèse et la supersymétrie suscitent de nombreux débats.

l'affût des traces de nouvelles particules, les superpartenaires, qui valideraient cette théorie. La quête est d'importance : si on ne les trouve pas, il faudra choisir entre s'obstiner pour sauver la théorie de la supersymétrie, ou l'abandonner… et réinventer un modèle pour la physique des particules *(voir La supersymétrie, une théorie en crise ?, page 40)*.

Les physiciens voudraient percer les secrets de la matière en identifiant ses constituants élémentaires. Les biologistes procèdent un peu de la même façon avec le monde vivant, en cherchant à répertorier toutes les réactions biochimiques qui assurent les fonctions biologiques, la division cellulaire, par exemple. Disposant ainsi de « modules élémentaires », ils pourraient les combiner pour produire des fonctions biologiques inédites, voire de nouveaux génomes *(voir le dossier Réinventer le vivant, page 19)*.

La biologie de synthèse et la supersymétrie suscitent de nombreux débats en raison des enjeux qu'elles représentent. On ignore aujourd'hui si les physiciens et les biologistes de demain marcheront sur les… traces de leurs prédécesseurs ! ■

Françoise Pétry directrice de la rédaction

sommaire

1 Édito

Actualités

4 Une toundra ancienne sous les glaces du Groenland

6 Un traumatisme transmis de père en fils

8 Une exolune détectée pour la première fois ?

9 L'origine du métabolisme

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

12 Point de vue
L'éthique animale, entre science et droit
Georges Chapouthier

14 Entretien
Copernicus, le futur œil de l'Europe sur la Terre
Cathy Clerbaux

16 Homo sapiens informaticus
La lunette de l'anthropologue
Gilles Dowek

17 Cabinet de curiosités sociologiques
Pourquoi les soucoupes volantes n'existent pas
Gérald Bronner

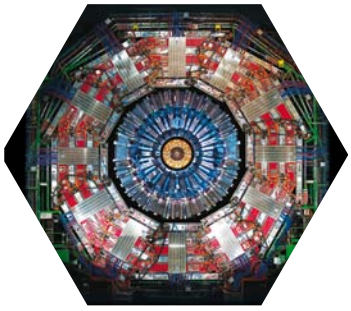
18 Lu sur SciLogs.fr
Enseigner le numérique à l'école, une nécessité
Thierry Vieville

Dossier : RÉINVENTER LE VIVANT

20 BIOLOGIE CELLULAIRE
Simuler une cellule vivante
Markus Covert
Des biologistes ont conçu un modèle numérique complet d'un organisme unicellulaire, qui reproduit son cycle de division. Cet outil éclaire d'un jour nouveau les mécanismes du vivant.

28 BIOTECHNOLOGIE
La biologie de synthèse : vers une ingénierie du vivant
François Képès
Concevoir un génome *ab initio*, inventer une cellule minimale, produire de nouvelles fonctions biologiques... Telles sont quelques-unes des ambitions de la biologie de synthèse. Son objectif : ouvrir de nouveaux horizons en biologie en s'inspirant des méthodes de l'ingénierie.

36 SCIENCE ET SOCIÉTÉ
Biologie de synthèse et sciences sociales, un dialogue difficile
Pierre-Benoit Joly et Benjamin Raimbault
Quel sera l'impact de la biologie de synthèse sur la société ? Comment éviter les dérives ? Les sciences sociales apporteraient un éclairage décisif si elles n'étaient pas cantonnées à un rôle inapproprié de médiateur.



40 PHYSIQUE DES PARTICULES
La supersymétrie, une théorie en crise ?
Joseph Lykken et Maria Spiropulu
Les théories supersymétriques promettent une meilleure compréhension du monde des particules élémentaires. Mais aucun indice de supersymétrie n'est apparu dans les expériences récentes du CERN. Cette idée séduisante risque-t-elle d'être abandonnée ?

Ce numéro comporte deux encarts d'abonnement *Pour la Science*, brochés sur la totalité du tirage.
En couverture : © Kenn Brown/Mondolithic Studios

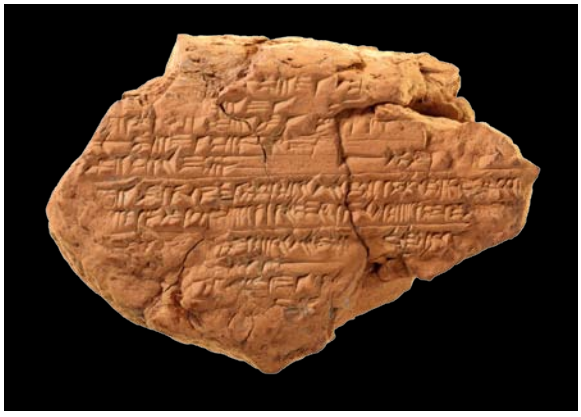
© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

48 ARCHÉOLOGIE

L'apprentissage du cunéiforme

Markus Hilgert

En Mésopotamie, l'écriture cunéiforme a été pratiquée pendant des millénaires. L'analyse des textes permet de reconstituer comment les scribes l'apprenaient. Elle indique aussi comment se prononçaient les langues transcrites en cunéiforme.



54 PHILOSOPHIE DES SCIENCES

Des corrélations à la causalité

Isabelle Drouet

À partir de données statistiques, peut-on déterminer les liens de cause à effet entre des phénomènes et, si oui, comment ? Les philosophes des sciences ont renouvelé les réflexions sur cette question.

62 CLIMATOLOGIE

Climat : le faux espoir

Michael Mann

Le réchauffement global s'est temporairement ralenti, mais une crise climatique menace toujours dans un avenir proche.

Rendez-vous

70 Histoire des sciences

Guldin et les indivisibles de Cavalieri

Amir Alexander

La préhistoire du calcul intégral, au XVII[e] siècle, a été marquée par la querelle sur les « indivisibles » du mathématicien italien Bonaventura Cavalieri.

74 Logique & calcul

Équations résolubles ou non ?

Jean-Paul Delahaye

Parfois, une équation semble impossible à résoudre. Impossibilité théorique et définitive, ou contournable ?

80 Science & fiction

Les X-men, des mutants prometteurs

J. Sébastien Steyer et Roland Lehoucq

82 Art & science

Alerte à la pollution en rouge et en vert

Loïc Mangin

84 Idées de physique

Les éoliennes verticales

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

89 Question aux experts

Sommes-nous commandés par des phéromones ?

Didier Trotier

91 Science & gastronomie

Éliminer l'odeur d'ail de l'haleine

Hervé This

92 À lire

96 Bloc-notes

Les chroniques de Didier Nordon

POUR LA SCIENCE .fr

Le site de référence de l'actualité scientifique internationale

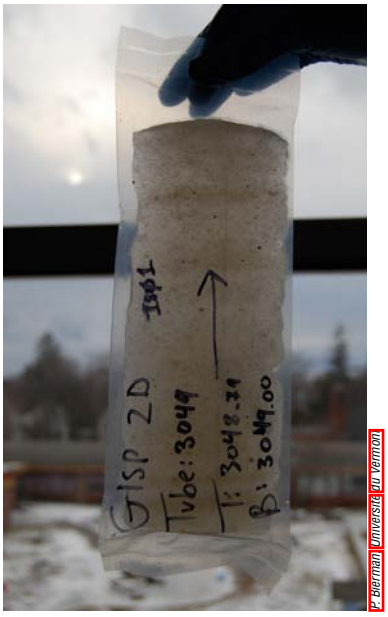
Toutes les archives*

- Pour la Science
- Dossier Pour la Science

depuis 1996 maintenant sur www.pourlascience.fr

* Numéros à lire en ligne ou téléchargeables en PDF, en vente à l'unité ou accessibles par abonnement.

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014



P. Bierman, University of Vermont

Le sol libéré par le retrait d'un glacier groenlandais. Un tel substrat de limon a aussi été identifié sous trois kilomètres de glace au centre du Groenland, grâce à un carottage profond *(à droite, un tronçon de la carotte)*.

Géosciences

Une toundra ancienne sous les glaces du Groenland

Un sol préservé a été découvert sous trois kilomètres de glace au centre du Groenland. Il est resté exposé à l'air libre pendant plusieurs centaines de milliers d'années, avant qu'une calotte de glace ne le recouvre, il y a quelque 2,7 millions d'années.

En 1993, cinq ans après avoir débuté, le forage GISP2 *(Greenland Ice Sheet Project)* de la calotte glaciaire groenlandaise centrale s'achève par le contact avec le socle granitique. Or les 15 derniers mètres de la carotte de 3053 mètres ainsi obtenue révèlent des sédiments riches en matière organique. Autour de Paul Bierman, de l'Université du Vermont aux États-Unis, une équipe américaine vient de les faire parler. Ces sédiments montrent qu'avant la formation de la calotte centrale groenlandaise, il y a quelque 2,7 millions d'années, une toundra a occupé le centre du Groenland pendant au moins 200 000 ans.

Il y aurait de la glace au Groenland depuis 38 millions d'années au moins, mais c'est au début du Pléistocène (ère qui s'étend d'environ 2,6 millions d'années à 12 000 ans avant le présent) que la calotte glaciaire groenlandaise s'est formée. Elle a persisté durant la trentaine de cycles glaciaire-interglaciaire qui ont suivi. Or les géologues considèrent que tous les glaciers arasent le sol sur lequel ils reposent, ce qui fait disparaître les paysages qu'ils recouvrent. En outre, l'étude des dépôts de sédiments marins autour du Groenland et de l'Amérique du Nord suggérait que depuis le début du Pléistocène, la succession des débâcles glaciaires a entraîné sur ces terres l'arasement d'une couche de sol de 100 mètres d'épaisseur…

Pas partout, a prouvé l'équipe de P. Bierman en étudiant la concentration en béryllium 10 dans les 15 derniers mètres de carotte. Cet isotope radioactif du béryllium (noyau atomique composé de quatre protons et six neutrons) est en effet cosmogénique, c'est-à-dire créé sous l'effet des rayons cosmiques incidents sur Terre. La couche de sédiments la plus riche en béryllium 10, que les chercheurs identifient au paléosol, en contient $3{,}8 \times 10^8$ atomes par gramme. Or une loi empirique, établie à partir de nombreuses mesures dans les sols arctiques, relie cette densité en masse à la densité en surface. Les chercheurs en ont déduit que le paléosol contient $6{,}7 \times 10^{10}$ atomes de béryllium 10 par centimètre carré. Comme on estime que $3{,}5 \times 10^5$ atomes de cet isotope sont créés par centimètre carré et par an au centre du Groenland, on en déduit que la durée d'exposition de ce sol aux rayons cosmiques a été d'au moins 190 000 ans.

Mais il est probable qu'en autant de temps, le sol se soit érodé, au moins un peu… En outre, les 2,7 millions d'années de la calotte glaciaire correspondent à deux demi-vies du béryllium 10, de sorte qu'au début du Pléistocène, le nombre d'atomes de cet isotope dans le sol du centre du Groenland était quatre fois supérieur. Pour ces deux raisons, les géologues concluent qu'une toundra a été présente au centre du Groenland pendant une durée comprise entre 200 000 ans et un million d'années avant le début du Pléistocène, époque où le climat était subarctique plutôt qu'arctique.

Le cas étudié par P. Bierman et ses collègues prouve par ailleurs qu'il est possible qu'un glacier laisse presque intact le sol qu'il recouvre durant des millions d'années. Les chercheurs veulent maintenant tenter de découvrir des paléosols intacts en Antarctique, où les calottes dépassent souvent quatre kilomètres d'épaisseur…

François Savatier

Science, vol. 344, pp. 402-405, 2014

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

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

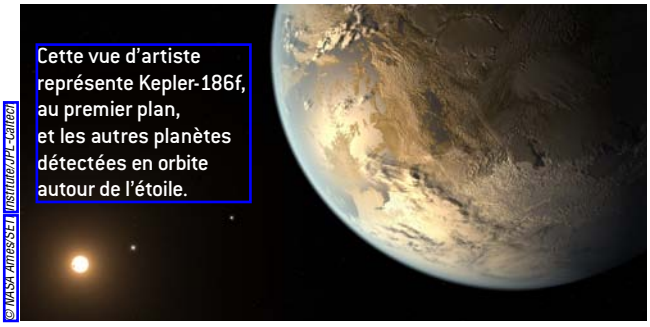
© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

Astrophysique

Une cousine de la Terre au climat tempéré

Les astronomes ont fait un pas de plus dans la recherche d'une exoplanète similaire à la Terre par sa composition, sa taille et la présence d'eau liquide à sa surface. Ils avaient déjà trouvé des astres de la taille de la Terre, et d'autres dans la zone habitable – la région ni trop proche ni trop lointaine de l'étoile où la température permet à l'eau de subsister à l'état liquide. Elisa Quintana, de l'Institut SETI, et ses collègues (dont des chercheurs du Laboratoire d'astrophysique de Bordeaux) ont identifié, à partir des observations du satellite *Kepler*, une exoplanète qui réunit les deux caractéristiques : Kepler-186f est à peine (11 pour cent) plus grande que la Terre et se trouve dans la zone habitable.

Cette planète est à 52 millions de kilomètres de son étoile (environ la distance qui sépare le Soleil de Mercure). Elle est pourtant dans la zone habitable, car elle est en orbite autour d'une étoile naine de classe M, plus froide que le Soleil. La planète pourrait contenir de l'eau liquide – à condition que de l'eau soit présente à la surface de la planète et qu'une atmosphère riche en dioxyde de carbone maintienne une certaine température. La prochaine étape sera de trouver un tel astre autour d'une étoile du même type que le Soleil !



Cette vue d'artiste représente Kepler-186f, au premier plan, et les autres planètes détectées en orbite autour de l'étoile.

© NASA Ames/SETI Institute/JPL-Caltech

Sean Bailly

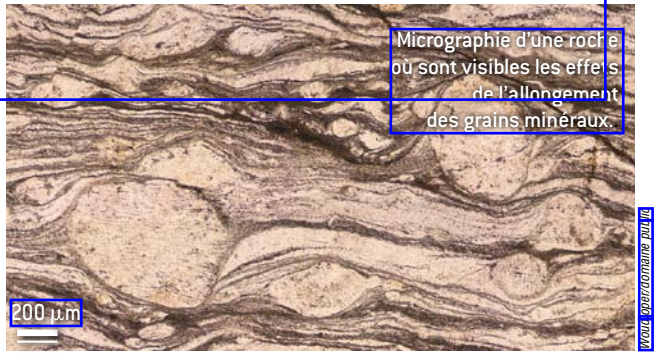
E. Quintana et al., Science, vol. 344, pp. 277-280, 2014

Géophysique

Comment le moteur de la tectonique a démarré

Depuis la naissance de la Terre, il y a plus de quatre milliards d'années, plusieurs cycles tectoniques de 400 à 600 millions d'années se sont succédé, durant lesquels une série de continents sont nés, se sont assemblés, se sont scindés et ont disparu. Le moteur tectonique à l'origine de ces cycles semble avoir mis au moins un milliard d'années à atteindre un fonctionnement régulier. David Bercovici, de l'Université de Yale, et Yanick Ricard, chercheur du CNRS au Laboratoire de géologie de Lyon, ont modélisé son démarrage.

L'idée est que les lents courants descendants de roches, dus à la convection thermique dans le manteau terrestre (les 2 900 premiers kilomètres de profondeur), ont créé des dépressions sous la croûte terrestre, et que cela a étiré les roches de la croûte terrestre et fini par créer des lignes de faiblesse, les futurs bords de plaques tectoniques.



Micrographie d'une roche où sont visibles les effets de l'allongement des grains minéraux.

Lars Hansen/Oxford U.(UK)

Les deux géologues ont élaboré un modèle mathématique de ce processus, en considérant que la lithosphère, la couche terrestre superficielle, est surtout composée de grains d'olivine et de grains de pyroxène. Sous l'effet de la déformation des roches, la taille des grains minéraux diminue, ce qui les rend encore plus déformables. Il s'ensuit un processus de fragilisation qui, si la déformation persiste, conduit à la formation d'un bord de plaque. Le modèle montre que, en raison notamment de la température modérée de la lithosphère, les processus de fragilisation sont bien plus rapides (de l'ordre de 10 millions d'années) que ceux de cicatrisation, et que leur accumulation conduit à la formation de plaques en un milliard d'années environ. Le modèle explique aussi pourquoi Vénus, où la lithosphère est plus chaude et où les roches cicatrisent donc beaucoup plus vite, est dépourvue de tectonique des plaques.

F. S.

Nature, vol. 508, pp. 513-516, 2014

Rongeurs sous influence

Pourquoi les résultats de certaines expériences sur les rongeurs sont-ils difficiles à reproduire ? Robert Sorge, de l'Université McGill, à Montréal, et ses collègues ont révélé une variabilité due au sexe de l'expérimentateur. En présence d'un homme ou de composés chimiques volatils typiques des aisselles masculines, les rats ont manifesté un stress supérieur, qui a augmenté leur tolérance à la douleur. L'effet était absent avec une femme. Le sexe de l'expérimentateur/trice devrait donc être pris en compte !

Trois atomes de largeur

Les dichalcogénures – contenant un métal de transition (molybdène) et du soufre ou du sélénium – sont, en monocouches, des semi-conducteurs présentant une grande mobilité d'électrons et une robustesse mécanique élevée. Ils forment des composants électroniques très plats, mais il restait à optimiser les jonctions entre les composants. Or Junhao Lin, de l'Université Vanderbilt et ses collègues ont mis au point un procédé de fabrication, avec un faisceau d'électrons, de nanofils de trois atomes de large du même matériau.

Sable mouillé… et glissant

Avec des collègues de divers pays, le physicien Daniel Bonn, de l'Université d'Amsterdam, a montré expérimentalement que le frottement sur du sable est fortement réduit si l'on ajoute à ce matériau granulaire un peu d'eau, mais pas trop. C'est la formation de ponts capillaires d'eau entre les grains qui augmente la résistance du matériau au cisaillement, et qui a pour effet de diminuer le coefficient de frottement. Lorsque le sable est trop mouillé, les ponts capillaires fusionnent entre eux, ce qui réduit la résistance au cisaillement et, partant, augmente le frottement.

Génétique

Un traumatisme transmis de père en fils

Des souris mâles peuvent transmettre un traumatisme précoce à leur descendance, via des microARN présents dans leurs spermatozoïdes.

© Alyssa Stiltz/Shutterstock.com

Des souriceaux mâles sont traumatisés quand on les sépare de leur mère. Les troubles résultant de ce stress précoce se transmettent à leurs descendants.

Et si les conséquences d'un traumatisme pouvaient se transmettre d'une génération à l'autre ? Depuis longtemps, les psychiatres observent que les descendants de personnes traumatisées, comme les survivants de camps de concentration ou les vétérans de guerre, sont plus susceptibles de développer des troubles tels qu'anxiété ou dépression. Mais s'affranchir des effets sociaux et environnementaux pour mettre en évidence une éventuelle transmission biologique reste très difficile chez l'homme.

Chez la souris, en revanche, le phénomène est avéré. En 2010, Isabelle Mansuy et ses collègues, de l'Université de Zurich, établissaient que les souris mâles peuvent transmettre à leur descendance des caractéristiques comportementales liées au stress. Dans une étude récente, la même équipe a montré que cette transmission s'effectuerait *via* l'ARN présent dans les spermatozoïdes.

Afin de déclencher un traumatisme précoce, les chercheurs ont séparé de leur mère des souriceaux mâles à des horaires aléatoires au début de leur vie. À l'âge adulte, ces souris montrent des signes de dépression, une aversion réduite pour la lumière et les espaces ouverts (des conditions de risque), et des troubles métaboliques liés au stress (hypersensibilité à l'insuline). Or ces troubles se transmettent à la descendance.

Pour identifier le mécanisme en jeu, les chercheurs ont analysé les spermatozoïdes des souris traumatisées et trouvé que des ARN de petite taille, dits microARN, étaient surexprimés en comparaison avec les souris normales. Les microARN font partie des molécules d'ARN dit non codant, qui n'intervient pas directement dans la synthèse des protéines. Si l'ARN non codant était autrefois considéré comme un « déchet », les biologistes savent aujourd'hui qu'il joue un rôle important dans la régulation de l'expression des gènes.

Chez les souris traumatisées, les microARN surexprimés étaient localisés dans des structures du cerveau (hippocampe et hypothalamus) liées à la gestion du stress, ainsi que dans les spermatozoïdes. Pour tester leur rôle éventuel, les chercheurs ont ensuite réinjecté l'ARN des spermatozoïdes dans des ovules fécondés de souris. Les souris qui en sont nées présentaient les mêmes troubles comportementaux et métaboliques que celles ayant « hérité » directement du traumatisme de leur père.

Reste à comprendre un fait intrigant : chez les souris de seconde génération, on ne constate pas de surexpression de microARN, alors que le traumatisme se manifeste pourtant à la troisième génération. Les chercheurs supposent qu'une stabilisation s'opère *via* des modifications épigénétiques (qui ne sont pas codées dans les gènes) influant sur l'accessibilité de l'ADN pour la transcription. « C'est la première fois qu'on montre le rôle de l'ARN dans la transmission d'un caractère acquis », souligne Valérie Grandjean, spécialiste en hérédité épigénétique à l'Institut de biologie Valrose, à Nice.

Le concept de transmission de caractères acquis, longtemps relégué aux oubliettes de la biologie, fait un retour en force depuis une quinzaine d'années. Grâce aux travaux en épigénétique, qui montrent qu'une hérédité est possible au-delà du seul code génétique, les biologistes commencent à mieux comprendre la façon dont des modifications environnementales peuvent se transmettre entre les générations.

Malgré quelques indices issus de l'épidémiologie, chez l'homme, la transmission par la voie paternelle d'un caractère induit par l'environnement reste à établir.

Yvan Pandelé

K. Gapp et al., Nature Neuroscience, en ligne le 13 avril 2014

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

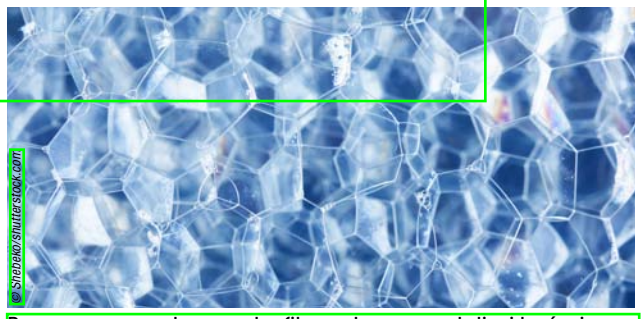
Physique

Le son bloqué par une mousse de savon

Comment se propage le son dans une mousse liquide ? Relativement peu d'études ont porté sur l'acoustique d'un tel milieu, et elles ont produit des résultats disparates. Juliette Pierre et Valentin Leroy, à l'Université Paris-Diderot, avec Benjamin Dollet, à l'Université de Rennes 1, ont mesuré l'atténuation du son par une couche de mousse liquide. Ils ont découvert que pour une certaine gamme de fréquences ultrasonores, la mousse absorbe l'onde acoustique et se comporte donc comme un isolant phonique.

Les expériences ont consisté à mesurer la transmission du son à travers une épaisseur de 0,5 millimètre de mousse, cette couche étant confinée entre deux films de plastique très minces. La mousse était préparée à partir d'une solution aqueuse de dodécylsulfate de sodium, un détergent répandu.

L'étude a porté sur une gamme de fréquences ultrasonores comprises entre 60 et 600 kilohertz, tandis que la taille caractéristique des bulles variait entre 30 et 100 micromètres (cette taille augmente à mesure que la mousse « vieillit »).



Dans une mousse de savon, les films et les canaux de liquide réagissent différemment aux vibrations de l'air dues à une onde sonore.

On constate que la vitesse de propagation du son est petite aux basses fréquences (de l'ordre de 30 mètres par seconde), et élevée aux hautes fréquences (environ 220 mètres par seconde). Surtout, aux fréquences intermédiaires, l'atténuation du son est forte.

J. Pierre et ses collègues ont pu expliquer leurs résultats en termes d'un modèle simple où la mousse est assimilée à un ensemble de films liquides minces, soutenus par des canaux étroits, mais plus massifs, de liquide. À basse fréquence, les films et les canaux vibrent en phase avec la pression de l'onde acoustique ; à haute fréquence, seuls les films vibrent. Mais aux fréquences intermédiaires, le mouvement des films est déphasé, ce qui conduit à un blocage du son.

Cette étude clarifie l'acoustique des mousses liquides et aidera peut-être à concevoir des isolants phoniques ou des sondes acoustiques pour caractériser les mousses produites en milieu industriel.

Maurice Mashaal

Phys. Rev. Lett., vol. 112, 148307, 2014

Le chromosome Y, en sursis ?

Aujourd'hui, le chromosome Y de l'homme ne comporte plus que trois pour cent des gènes que son ancêtre contenait il y a 200 à 300 millions d'années. Est-il en train de disparaître ? Daniel Bellott, du MIT aux États-Unis, et ses collègues ont étudié le chromosome chez différentes espèces de mammifères pour reconstruire son évolution. La perte se serait stabilisée depuis 25 millions d'années, probablement parce que les gènes restants ont un rôle essentiel dans la synthèse de protéines.

Une plante caméléon

Le mimétisme, fréquent chez les animaux, est plus rare chez les plantes. Ernesto Gianoli, de l'Université de la Serena, au Chili, et son collègue ont montré que la plante grimpante Boquila trifoliolata, endémique de la forêt tropicale, imite les feuilles des différents types d'arbres auxquels elle s'accroche. Elle se dissimule ainsi aux yeux des herbivores. Les mécanismes en jeu restent à déterminer, mais ils pourraient impliquer des composés volatils émis par l'arbre.

Éthologie

Des chenilles qui imitent le son des fourmis

Pénétrer discrètement dans une fourmilière n'est pas chose aisée, y vivre encore moins : les fourmis défendent farouchement leur territoire. Grâce à de nombreux signaux chimiques et acoustiques, elles distinguent les intrus des membres de la colonie. Pourtant, près de 10 000 espèces d'arthropodes vivent au sein des fourmilières, à l'abri des dangers de l'extérieur. Les chenilles des papillons *Maculinea* sont ainsi connues pour user de mimétisme acoustique afin de tromper la vigilance des fourmis, ce qui leur permet de s'introduire dans les nids.

Marco Sala et ses collègues, de l'Université de Turin, ont étudié l'importance du mimétisme acoustique dans la stratégie adoptée par ces papillons pour se nourrir.

Ils ont enregistré le son émis par des ouvrières et des reines de l'espèce de fourmis *Myrmica scabrinodis*, puis celui produit par des chenilles *Maculinea alcon* et *Maculinea teleius*. Ces dernières émettent des stridulations similaires à celles des fourmis reines, ce qui pousse les ouvrières à les emmener dans le nid.

Les chenilles y restent entre 11 et 23 mois. Durant cette période, les chenilles n'ont pas toutes le même comportement. Celui-ci dépend de l'espèce et de la qualité de l'imitation des sons de la fourmi reine. Les enregistrements sonores ont montré que les stridulations de la chenille *Maculinea alcon* sont plus ressemblantes. Leurs sons suscitent davantage l'attention des fourmis ouvrières, qui les nourrissent alors par trophallaxie (les fourmis leur régurgitent de la nourriture). La chenille *Maculinea teleius*, elle, imite moins bien la fourmi reine et attire beaucoup moins l'attention des ouvrières. Une discrétion utile à la chenille, puisqu'elle a un comportement de prédation : elle se nourrit des larves de ses hôtes !

S. B.

PloS One, vol. 9(4), e94341, 2014

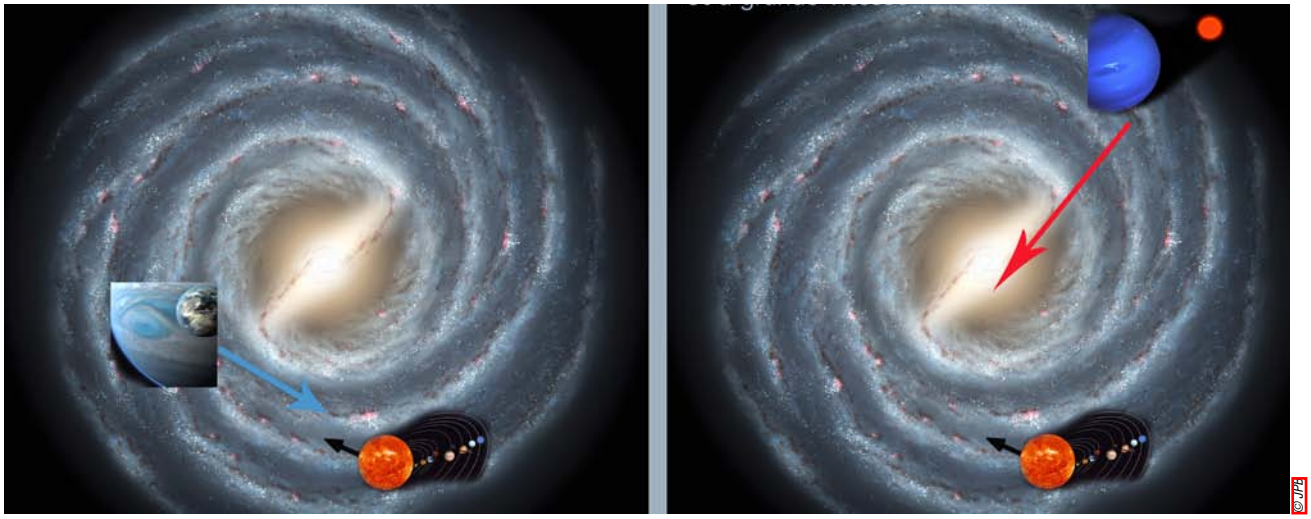
Une chenille *Maculinea* emmenée au nid par une ouvrière *Myrmica*... qui la prend pour une reine ?

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

Astronomie

Une exolune détectée pour la première fois ?

Une équipe internationale a peut-être détecté pour la première fois un satellite autour d'une planète extrasolaire, à 2 000 années-lumière de nous.



L'objet détecté pourrait être une exolune moitié moins massive que la Terre, en orbite autour d'une planète située à 2 000 années-lumière du Système solaire, qui errerait hors de tout système stellaire *(à gauche ; les flèches indiquent les positions respectives de ce système et du Système solaire dans la Voie lactée)*. Il pourrait aussi d'agir d'une petite étoile située dans la zone centrale de la Galaxie et autour de laquelle évolue une planète de 18 masses terrestres *(à droite)* – un scénario qui correspond un peu moins bien aux observations.

Les déserts cratérisés de la Lune, les geysers de glace d'Encelade, les lacs de méthane de Titan, le volcanisme massif d'Io… Les planètes du Système solaire abritent des satellites d'une diversité fascinante. Est-ce aussi le cas des exoplanètes, en orbite autour d'autres étoiles que le Soleil ? Une équipe menée par Virginie Batista, de l'Institut d'astrophysique de Paris, et David Bennett, de l'Université Notre Dame, aux États-Unis, apporte un élément de réponse : elle pourrait avoir détecté pour la première fois une exolune – un satellite en orbite autour d'une planète extrasolaire.

Les astrophysiciens ont exploité un effet qualifié de lentille gravitationnelle : quand un objet massif passe entre la Terre et une étoile lointaine, il dévie et focalise la lumière de cette étoile, à l'instar d'une lentille. L'étoile lointaine apparaît alors légèrement plus brillante. Les caractéristiques de cette augmentation de brillance (le nombre de pics de luminosité, la durée, etc.) renseignent sur l'objet-lentille, qui peut par exemple être une galaxie ou une étoile (seule ou accompagnée d'exoplanètes).

Les astrophysiciens se sont fondés sur les observations effectuées par plusieurs télescopes, appartenant notamment aux collaborations internationales PLANET *(Probing Lensing Anomalies NETwork)*, et MOA *(Microlensing Observation in Astrophysics)*. Une augmentation de la brillance d'une étoile lointaine, d'une durée de trois jours, a été observée. De subtiles fluctuations de cette augmentation pendant 75 minutes ont révélé que l'objet-lentille est un système double, constitué d'un petit corps en orbite autour d'un objet plus massif. La difficulté est que le signal peut correspondre à deux systèmes de ce type, l'un proche et l'autre plus lointain et plus massif.

Dans le premier cas, il s'agirait d'une exoplanète errante (non rattachée à un système stellaire) quatre fois plus massive que Jupiter et accompagnée d'un satellite d'une demie masse terrestre, nommé MOA-2011-BLG-262Lb. Ce couple se situerait à 2 000 années-lumière du Système solaire. Dans le second cas, l'objet-lentille serait une étoile de 0,12 masse solaire, autour duquel tournerait une planète de 18 masses terrestres. Éloigné de 22 800 années-lumière, il se situerait dans le bulbe galactique (la zone centrale de la Voie lactée, très dense en étoiles) et se déplacerait à grande vitesse. Ce second cas correspond un peu moins bien aux observations, mais l'écart n'est pas suffisant pour le disqualifier.

Quoi qu'il en soit, ces résultats montrent que la méthode employée est assez sensible pour détecter des exolunes. Selon les astrophysiciens, il est rare que plusieurs scénarios soient aussi difficiles à départager, et les futures observations de lentilles gravitationnelles devraient donc livrer des détections moins ambiguës.

Il y a cinq ans, des travaux avaient déjà montré que des exolunes sont théoriquement détectables avec les observations du télescope spatial *Kepler*, lancé en 2009, grâce à la méthode des transits. Celle-ci consiste à observer la baisse de luminosité provoquée par le passage d'une planète – et de son satellite éventuel – devant son étoile. Mais pour l'instant, aucun candidat n'a été détecté par cette méthode. MOA-2011-BLG-262Lb est donc le premier candidat sérieux au statut d'exolune.

Guillaume Jacquemont

D. Bennett et al., Astrophysical Journal, en ligne le 7 avril 2014

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

Climatologie

Climat : le poids des mots

Selon les dernières prévisions du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC), il est « très probable » que les vagues de chaleur se multiplieront dans les prochaines années. Grâce à une enquête menée auprès d'environ 13 000 personnes, David Budescu, de l'Université Fordham à New York, et ses collègues, ont montré que de telles affirmations sont perçues de façon trop approximative par le public.

Tous les cinq à sept ans, le GIEC publie un bilan des connaissances sur le réchauffement climatique. Pour communiquer sur la fiabilité des prédictions, il préconise l'emploi de termes standardisés, tels que « très probable », qu'il fait correspondre à une probabilité de plus de 90 pour cent. Cependant, ces termes sont perçus de façon imprécise par le public : « très probable » est par exemple associé à une probabilité moyenne d'environ 65 pour cent. En outre, les probabilités associées par une personne à ce terme varient notablement en fonction de divers facteurs, tels que ses idées en matière de réchauffement climatique. Les chercheurs ont montré qu'indiquer à chaque fois les probabilités correspondant aux différents termes rend plus précise la perception des informations. Ils préconisent donc d'adopter un tel mode de communication.

G. J.

D. Budescu et al., Nature Climate Change, en ligne le 20 avril 2014

Insolite

Un couple brésilien inversé

Branle-bas de combat dans le Landernau de la sexualité. On a découvert au Brésil un insecte du genre *Neotroglia* (ordre des *Psocodea*) chez qui le pénis (ici un gynosome) est porté par la femelle tandis que le mâle est doté d'un vagin (un phallosome) ! Qui plus est, ce sont les femelles qui se « battent » pour les mâles. Rappelons que les sexes ne sont pas déterminés par les organes, mais par les cellules sexuelles.

K. Yoshizawa et al., Current Biology, en ligne le 17 avril 2014

© K. Yoshizawa & al.

Biologie

L'origine du métabolisme

Une étude menée par Markus Ralser, de l'Université de Cambridge, suggère que les réactions métaboliques qui fournissent de l'énergie à la cellule sont apparues en l'absence des molécules enzymatiques complexes qui les catalysent aujourd'hui. Éclairage du biologiste Brice Felden.

Quel est l'enjeu de ces travaux ?

Brice Felden : Comprendre les origines de la vie ! La vie est sans doute apparue lorsque des systèmes simples ont été capables de s'autoreproduire et d'évoluer en transformant de la matière organique en énergie réutilisable pour croître et s'amplifier. Déterminer comment sont apparues ces réactions métaboliques est une étape clé dans cette quête. Aujourd'hui, deux hypothèses sont plausibles.

L'une affirme que les molécules informationnelles seraient antérieures aux métabolismes : des molécules autocatalytiques (qui catalysent leur propre formation, à l'instar de certains ARN) se seraient d'abord formées, et les premiers métabolismes seraient les fruits de l'évolution des réactions catalysées par ces molécules.

L'autre hypothèse est que le métabolisme serait apparu d'abord, sous la forme de réactions simples ayant facilité l'émergence de catalyseurs et de molécules informationnelles réplicatives ; les métabolismes primordiaux auraient ainsi gagné peu à peu en complexité. Les chercheurs se sont intéressés à cette hypothèse.

En quoi consiste leur étude ?

B. F. : Ils ont montré que placer des sous-produits simples du métabolisme, ou métabolites, dans des conditions « prébiotiques », imitant celles présentes aux débuts de la vie, catalyse des conversions entre ces métabolites. Dans les organismes actuels, de telles conversions sont impliquées dans le métabolisme des sucres et de certains constituants des acides nucléiques (ADN et ARN). Les réactions observées sont particulièrement sensibles aux ions ferreux (Fe^{2+}), dont la concentration aurait été élevée dans les océans primitifs.

B. Felden dirige l'unité U835 (Inserm, Université de Rennes I).

Partir de métabolites ne biaise-t-il pas l'étude ?

B. F. : M. Ralser et ses collègues supposent que la synthèse des métabolites devrait être possible dans des conditions prébiotiques. Ils s'inspirent ici d'autres études, notamment celle réalisée par Stanley Miller. En 1953, ce chimiste américain a produit quelques acides aminés (les constituants des protéines) en soumettant un mélange gazeux de méthane, d'hydrogène, d'ammoniac et d'eau à des décharges électriques. Depuis, la plupart des acides aminés naturels ont été synthétisés dans des conditions prébiotiques. Il faudrait à présent montrer que les métabolites utilisés peuvent se former dans des conditions prébiotiques et produire des métabolismes primitifs.

Quelle hypothèse l'emporte ?

B. F. : Chacune a des éléments en sa faveur et j'opterais pour un mélange des deux. Les métabolismes et les molécules informationnelles pourraient avoir eu plusieurs origines et avoir été ensuite sélectionnées en fonction des conditions environnementales.

Marie-Neige Cordonnier

M. A. Keller et al., Mol. Syst. Biol., vol. 10, pp. 725-736, 2014

Science des matériaux

Du graphène fait au mixeur

Jonathan Coleman, du *Trinity College* à Dublin, et ses collègues ont découvert que l'on peut produire du graphène – des couches de carbone d'épaisseur monoatomique – par une méthode très simple et industrialisable.

Le principe : mixer du graphite incorporé à un solvant liquide. En utilisant des mixeurs puissants, disponibles dans le commerce, les chercheurs ont montré que le cisaillement intense crée en abondance des écailles de graphène sans défauts. Ils estiment qu'en procédant sur un volume de 10 mètres cubes, on pourrait produire 100 grammes de graphène de bonne qualité par heure – loin devant les méthodes existantes, qui pèchent soit par leur rendement, soit par la qualité du graphène obtenu. Et la technique pourrait s'appliquer à d'autres matériaux en couches intéressants, tels le nitrure de bore et le disulfure de molybdène.

M. M.

K. R. Paton et al., Nature Materials, en ligne le 20 avril 2014

Entomologie

Une guêpe qui détraque

Le Muséum d'histoire naturelle de Berlin vient de nommer une guêpe thaïlandaise en s'inspirant de la saga *Harry Potter*. Il faut dire que le mode de chasse d'*Ampulex dementor* évoque fortement les Détraqueurs (« *Dementors* » en anglais) de la série, qui se nourrissent de l'âme de leurs victimes. Lorsque la guêpe pique un cafard, sa proie favorite, ce dernier devient docile et se laisse guider jusqu'à un endroit où il pourra servir de pouponnière vivante à la progéniture de la guêpe…

Le nom d'*Ampulex dementor* a été choisi par les visiteurs du musée, et non par le descripteur de l'espèce comme c'est l'usage. Il s'agissait de faire en sorte que les visiteurs « se sentent émotionnellement connectés à la biodiversité et à sa richesse », expliquent les chercheurs, qui se félicitent du succès de l'opération. Elle s'inscrit dans un courant en plein essor : les sciences participatives, qui visent à intégrer le citoyen dans les programmes de recherche.

Y. P.

M. Ohl et al., PLoS One, en ligne le 22 avril 2014

Astrophysique

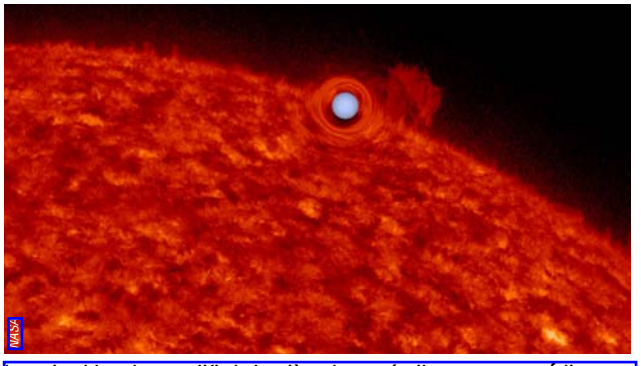
Une lentille gravitationnelle au cœur d'un système binaire

En recherchant des exoplanètes, Ethan Kruse et Eric Agol, de l'Université de Washington, ont découvert un phénomène prévu en 1973 mais jamais observé : un système binaire d'étoiles amplifiant sa propre lumière par effet de lentille gravitationnelle.

Les astronomes cherchaient des baisses faibles et périodiques de la luminosité d'une étoile, dues à une exoplanète qui occulte régulièrement une partie du rayonnement. Toutefois, dans le cas de l'objet KOI-3278, E. Kruse et E. Agol ont détecté une alternance de baisses et de hausses. Or ces dernières ne peuvent s'expliquer que par un effet de lentille gravitationnelle. L'objet KOI-3278 est composé de deux étoiles. L'une est similaire au Soleil, l'autre est un objet compact de type naine blanche. Lorsque la naine blanche passe devant son compagnon, son champ gravitationnel courbe la lumière suivant les lois de la relativité générale d'Einstein, et la focalise dans notre direction. La lumière qui nous parvient augmente ainsi de l'ordre de 0,1 pour cent. L'amplification lumineuse atteint cette valeur mesurable grâce à une configuration favorable du système binaire : la distance entre les compagnons de KOI-3278 est grande (et même la plus grande connue à ce jour pour un tel système).

S. B.

Science, vol. 344, pp. 275-277, 2014



La naine blanche amplifie la lumière de son étoile compagnon (distante de 70 millions de kilomètres) par effet de lentille gravitationnelle *(vue d'artiste)*.

La dopamine visualisée dans le cerveau

Pour visualiser dans le cerveau certaines molécules intéressantes, on élabore des sondes moléculaires, qui perturbent le champ magnétique local quand elles se lient aux molécules cibles. Celles-ci sont alors détectables par IRM. Par cette méthode, Taekwan Lee, du MIT, et ses collègues ont observé la dopamine (l'un des principaux neurotransmetteurs) libérée dans le cerveau de rats suite à une stimulation électrique. Une nouvelle sonde moléculaire au service des chercheurs, voire des médecins.

Controverse sur les cellules STAP

La controverse sur les cellules souches produites par choc acide, dites cellules STAP, bat son plein. L'inventeur du procédé, la Japonaise Haruko Obokata, est mise en cause par son propre institut pour fraude scientifique. De son côté, H. Obokata réfute les accusations et continue d'affirmer la réalité de sa découverte. Problème : la réplication des résultats semble se faire attendre. L'affaire fait grand bruit au Japon, où la jeune biologiste était devenue, en quelques semaines, une vedette médiatique.

Pas trop de rimmel !

Les femmes ont tendance à surestimer la dose de maquillage qui plairait le plus aux autres, en particulier aux hommes, rapportent Alex Jones, de l'Université de Bangor, et deux collègues. Résultat : elles se maquillent plus que ce qu'elles jugent elles-mêmes attirant, sans doute pour se conformer à un stéréotype… infondé.

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

SciLogs

La nouvelle communauté de blogueurs scientifiques francophones

De blogs en blogs, explorez la science en direct avec ceux qui la font, commentez les articles et participez au débat !

Complexités

Vos raisonnements et conceptions seront remis en question par Jean-Paul Delahaye, auteur de la rubrique Logique et Calcul dans *Pour la Science*. Dans son blog, il présente des jeux et énigmes mathématiques, des paradoxes logiques et numériques et des nouveautés en informatique.

Signal sur bruit

Découvrez les réflexions de l'astrophysicien Richard Taillet. Matière noire, énergie sombre et autres découvertes en physique et astrophysique… votre soif de connaissance sera assouvie !

Best of Bestioles

Explorez chaque semaine les merveilles du monde animal, dans le blog de Loïc Mangin, rédacteur en chef adjoint de la revue *Pour la Science*. Insectes, mammifères, crustacés, amphibiens et bien d'autres n'auront bientôt plus de secrets pour vous !

Retrouvez aussi les autres communautés « SciLogs » : déjà plus de 140 blogueurs scientifiques à l'international !

Connectez-vous maintenant pour découvrir www.Scilogs.fr !

Suivez les dernières actualités des blogueurs également sur les réseaux sociaux

Proposé par POUR LA SCIENCE

POINT DE VUE

L'éthique animale, entre science et droit

Malgré une lente évolution positive du statut juridique des animaux, les lois françaises relatives à ces derniers comportent de nombreuses incohérences. Le législateur devrait s'inspirer des connaissances scientifiques sur les animaux et leur sensibilité.

Georges CHAPOUTHIER

La question du droit de l'animal est un thème d'actualité. Un récent amendement à la loi de modernisation et de simplification du droit, adopté par l'Assemblée nationale, vise à définir dans le Code civil l'animal comme un « être vivant doué de sensibilité [...] soumis au régime des biens corporels ». Même si cette proposition, bien que très symbolique et sans conséquences pratiques sur le plan juridique, doit encore être validée par diverses instances, tel le Conseil constitutionnel, elle s'inscrit dans un mouvement, lent mais régulier, qui amène notre pays à mieux traiter nos cousins animaux. Qu'en est-il plus précisément et que peut en dire le biologiste ?

La France est un vieux pays de tradition cartésienne et René Descartes avait, très malencontreusement, assimilé les animaux aux automates de son époque. Sa pensée avait ensuite été poussée à l'extrême par son disciple Nicolas Malebranche, qui considérait que rien ne distinguait un chien qui aboyait d'une horloge qui sonnait l'heure.

Cette tradition de l'animal-objet reste très présente. En témoigne la manière abominable dont les animaux sont traités dans nos élevages industriels ou lors des abattages. En témoigne aussi le fait que, sur de nombreux dossiers concernant la protection animale, la chasse ou l'écologie, la France brille par son retard sur d'autres pays d'Europe. Ainsi, la chasse à courre, interdite en Grande-Bretagne, continue à être pratiquée en France, et il en est de même de la course de taureaux, avec torture et mise à mort, qui est interdite en Catalogne.

Le respect de l'animal reste une question difficile, car il existe des catégories très différentes d'animaux. La plupart des discussions, y compris l'amendement mentionné, éludent le problème en restant dans une définition floue, voire absente, des animaux et de leur sensibilité.

NOS LÉGISLATEURS DEVRAIENT se mettre à l'écoute des scientifiques et définir précisément ce qu'ils entendent par « animal », ce qui les amènera à distinguer des groupes animaux de sensibilités différentes.

Ainsi, à quelle forme de sensibilité l'amendement fait-il allusion ? Les plantes, bien que dépourvues de nerfs et de muscles, ont une sensibilité qui leur permet de détecter divers stimuli physico-chimiques de l'environnement et d'y réagir par des mouvements adaptés. Et considère-t-on tous les animaux, y compris les coquillages, les vers et les insectes par exemple, ou seulement les mammifères et les oiseaux, avec qui les hommes ont l'habitude d'avoir des liens ?

D'autres textes plus précis, comme ceux du Code rural qui réglementent l'expérimentation animale en laboratoire, mentionnent explicitement certains groupes d'animaux – l'ensemble des vertébrés, plus certains invertébrés particulièrement intelligents tels que les pieuvres – comme étant aptes à ressentir la douleur et à éprouver souffrance ou angoisse. Il y reste des incohérences, puisque certaines formes embryonnaires des mammifères, au dernier tiers de leur développement (stade fœtal), sont protégées, mais pas celles d'autres vertébrés, tels les oiseaux, au même niveau de développement et à un stade comparable.

Généralement, la plupart des espèces animales sont passées sous silence, comme si elles n'existaient pas. Fendre en deux un homard vivant ou le jeter dans l'eau bouillante ne semble pas poser de problème particulier. Découper sur des requins vivants les ailerons, puis rejeter ces animaux à la mer où ils agoniseront une quinzaine de jours ne choque pas davantage. On pourrait multiplier les exemples.

Nos législateurs devraient se mettre à l'écoute des scientifiques et définir précisément ce qu'ils entendent par « animal », ce qui les amènera à distinguer des groupes animaux de sensibilités différentes, sans parler des animaux dépourvus de sensibilité nerveuse, telles les éponges. Les défenseurs des animaux ont ainsi proposé, en fonction des aptitudes des différents groupes d'animaux, des critères visant à estimer les degrés de sensibilité. Sans doute serait-il utile que les législateurs en prennent connaissance.

Même si on laisse dans le flou la définition de ce qu'est un animal, il existe dans nos

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

LES FAISANS D'UN ÉLEVAGE sont protégés par certains textes juridiques ; mais dès qu'ils sont lâchés pour les besoins de la chasse *(a)* et deviennent « sauvages », plus aucune loi ne les protège, même s'il s'agit des mêmes individus : les faire souffrir n'est alors plus illégal. Une souffrance dont les signes physiologiques et comportementaux ne sont faciles à repérer que chez les mammifères *(b)* et les oiseaux.

textes de loi des contradictions que le récent amendement vise à amoindrir.

Pour le Code rural, depuis 1976, l'animal détenu par l'homme est explicitement reconnu comme un être sensible. Pour le Code pénal, la reconnaissance est seulement implicite : les mauvais traitements ou les actes de cruauté sur les animaux domestiques sont punis.

Le Code civil restait en retrait. Les animaux y étaient considérés comme des biens (qui peuvent selon les cas être déplacés ou non lorsqu'ils sont attachés à un fonds pour leur exploitation), certes différents des corps inanimés et des objets tels que tables et chaises, mais sans que leur sensibilité soit clairement affirmée. Ce sera chose faite si la modification proposée est entérinée et les animaux seront alors considérés comme des « êtres vivants doués de sensibilité ».

La cohérence de nos textes en sera alors améliorée. Mais cette cohérence demeure timide, car les animaux restent considérés comme des biens, certes dotés d'un corps sensible, mais que l'on peut toujours vendre ou exploiter, des biens auxquels nos textes ne visent pas à donner un statut qui serait en complète rupture avec la « chose ».

Pour les défenseurs des animaux, cette mise en cohérence des textes, si elle va dans le bon sens, reste très insuffisante. Elle continue à entériner de nombreuses dérogations : torture de taureaux pour le maintien d'une tradition locale, chasse de loisir, divers procédés de mise à mort brutale ou de mutilations sans anesthésie, abattages religieux sans étourdissement préalable des animaux (interdits dans plusieurs pays européens pour des raisons morales), etc.

Surtout, les textes qui protègent dans certains cas les animaux détenus par l'homme ne s'intéressent pas du tout aux animaux sauvages, sauf lorsqu'ils sont tenus en captivité ou que leur espèce est menacée d'extinction.

Prenons l'exemple des faisans. La chasse ayant réduit les effectifs de nombreux animaux sauvages, les fédérations de chasse organisent des lâchers, dans la nature, de faisans élevés. Tant qu'ils restent en élevage, ces faisans sont protégés contre tout acte de cruauté ou de maltraitance de la part des humains. Mais dès qu'ils sont lâchés dans la nature, donc considérés comme « sauvages », même s'ils sont, d'une certaine manière, apprivoisés (on dit, techniquement, « imprégnés » à l'homme), ils ne sont plus protégés par aucune loi et peuvent être blessés ou mutilés à souhait. Pourtant, comme ce sont les mêmes faisans, leur sensibilité n'a pas changé…

La plus grande amélioration de la cohérence des textes serait sans doute la reconnaissance générale, conforme aux connaissances des biologistes, de la sensibilité des animaux, qu'ils soient domestiques ou sauvages, qu'ils vivent en captivité ou en liberté, avec différents degrés selon leurs aptitudes physiologiques et comportementales. La vraie amélioration morale serait une complète remise à plat du statut de l'animal dans nos textes législatifs, qui prenne en compte les données de la biologie et qui permette d'attribuer aux animaux, selon leur espèce, des droits qu'il restera au législateur à définir.

Certes, ce n'est en aucun cas au scientifique de faire les lois ; mais, à l'inverse, aucun législateur sérieux ne peut ignorer les résultats de la science. ■

Georges CHAPOUTHIER est directeur de recherche émérite au CNRS et membre du conseil d'administration de la Fondation « Droit animal, éthique et sciences ».

Réagissez au Point de vue sur www.pourlascience.fr

ENTRETIEN

Copernicus, le futur œil de l'Europe sur la Terre

Entretien avec **Cathy CLERBAUX**

Le 3 avril dernier, une fusée Soyouz a placé sur orbite le satellite *Sentinel-1A*, premier d'une flottille de plus de dix satellites d'observation de la Terre qui seront progressivement mis en service d'ici la fin de la décennie. Les *Sentinel* représentent la composante spatiale du programme *Copernicus*, financé conjointement par l'Union européenne et par l'Agence spatiale européenne. L'objectif de ce programme de 3,8 milliards d'euros est double. D'abord, livrer des données homogènes et continues sur une décennie au moins, qui feront de l'Europe un acteur de premier plan dans l'observation de la Terre. Ensuite, offrir à tous les citoyens un service d'information en temps réel et de prévision sur la qualité de l'air, l'état des sols, le niveau des mers ou les catastrophes naturelles. Cathy Clerbaux, directrice de recherche au Laboratoire Atmosphères, milieux, observations spatiales (LATMOS, CNRS/ UPMC/UVSQ), a contribué à la conception des instruments de *Sentinel-5* et participe au service Atmosphère du programme *Copernicus*. Elle nous explique ici les enjeux de ce projet ambitieux.

POUR LA SCIENCE

En quoi consistent le programme *Copernicus* et les satellites *Sentinel* ?

CATHY CLERBAUX : La composante spatiale du programme *Copernicus* (ex-GMES) regroupe cinq familles de satellites d'observation de la Terre, les *Sentinel*, qui seront lancés progressivement d'ici la fin de la décennie (une sixième est en discussion). Ils observeront la surface des continents, les océans et l'atmosphère et fourniront des données sur l'évolution des terres cultivées et des zones urbaines, la diminution ou la croissance des forêts, la fonte des glaces, les zones de pêche, les concentrations des gaz à effet de serre, l'augmentation des températures, la qualité de l'air, etc. Ces informations seront notamment utiles pour le suivi des changements climatiques et la gestion des risques naturels.

La seconde composante du programme *Copernicus* est formée par les « services », des dispositifs de traitement qui intégreront les données satellitaires dans des modèles atmosphériques, océaniques, climatologiques, etc., pour fournir *in fine* des données directement exploitables. Ces services, destinés aux scientifiques, aux institutions et aux citoyens, se répartissent en six grands thèmes : Terre, Mer, Atmosphère, Situations de crise, Sécurité et Climat.

PLS

Qu'est-ce qui différencie les missions *Sentinel* des missions existantes d'observation de la Terre ?

C. C. : Aujourd'hui, un ensemble de satellites couvrent les besoins de surveillance des terres, des mers et de l'atmosphère. Citons par exemple, pour les États-Unis, les satellites LANDSAT et *Jason*, et, pour l'Europe, la filière SPOT et les plates-formes *MetOp*.

La première avancée avec les missions *Sentinel*, c'est que les données seront disponibles presque en temps réel, une à deux heures à peine après le passage du satellite ! Ensuite, à l'inverse des missions individuelles, les *Sentinel* ont été conçus dès le départ comme une flottille intégrée. Les lancements sont prévus pour permettre d'assurer un flux de données continu sur une dizaine d'années au moins ; et surtout, ces données seront homogènes. Ainsi, on pourra facilement comparer les données provenant des différents satellites, ce qui est fondamental.

De fait, la véritable innovation du programme *Copernicus*, c'est la réflexion globale qui a été menée pour collecter, rassembler et homogénéiser toutes les informations qui seront produites. Le plus révolutionnaire, ce ne sont pas les satellites, mais les services qui traiteront leurs données !

PLS

Que recouvrent précisément ces services ?

C. C. : Leur fonctionnement est calqué sur celui des prévisions météorologiques : des instruments bien exploités et un service intégré géré par des scientifiques. Ce modèle sera adapté de façon similaire pour la surveillance des océans, des sols, du climat, etc.

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

Prenons l'exemple du service Atmosphère (d'ailleurs installé au Centre européen pour la prévision météorologique à moyenne échelle ECMWF, en Angleterre, qui est aussi le Centre météorologique européen de référence). Les *Sentinel-4* et *Sentinel-5* fourniront des mesures journalières et à l'échelle globale de polluants tels que l'ozone, le dioxyde d'azote, le dioxyde de soufre, le monoxyde de carbone et les particules. *Sentinel-4*, en orbite géostationnaire, scrutera toutes les heures l'Europe, tandis que *Sentinel-5*, en orbite polaire, passera une à deux fois par jour au-dessus de chaque région du globe et permettra d'avoir une vision plus globale.

Le service Atmosphère s'appuiera notamment sur ces mesures pour alimenter des modèles de chimie atmosphérique à l'échelle globale et à l'échelle régionale. Ces modèles pourront fournir des données et des prévisions sur les concentrations de chaque polluant et sur la qualité de l'air. Ensuite, des alertes seront envoyées aux citoyens ou aux institutions abonnés à ces services. Un asthmatique pourra par exemple être informé par SMS à quel moment la pollution prévue pour les prochaines heures dépassera un seuil. Les municipalités pourront prendre des mesures préventives en cas de pic de pollution attendu. Aujourd'hui, faute d'informations intégrées, les alertes ne sont pas encore fiables, si bien que l'on ne réagit qu'après coup…

PLS

Quelles sont les retombées attendues en sciences de la Terre ?

C. C. : Aujourd'hui, nous sommes gênés par les formats différents de données fournies par des satellites divers. Les données de *Copernicus* seront « prémâchées », plus faciles à utiliser, même si les observations ne sont pas l'œuvre d'un même instrument. Cela sera notamment utile pour la question du rythme du réchauffement climatique. Depuis une dizaine d'années, l'augmentation de la température globale est plus lente que prévu. Pourtant, les gaz à effet de serre continuent à s'accumuler, le niveau des mers à monter, et la glace polaire à fondre ! Pour résoudre cette contradiction apparente, il faudrait tout regarder en même temps, au même endroit et sur le long terme, pour identifier ce qui ne fonctionne pas dans nos simulations (les modèles sous-estiment probablement le stockage de l'énergie par l'océan). Le programme *Copernicus* devrait le permettre.

PLS

Quel est l'état d'avancement du projet ?

C. C. : Les services Atmosphère, Terre, Mer et Situations de crise ont atteint leur maturité et sont ou rentreront bientôt en phase opérationnelle (même si tous les satellites *Sentinel* ne sont pas encore lancés). Pour le service Sécurité, c'est plus compliqué, en raison des aspects politiques, mais aussi parce qu'en matière de sécurité, l'observation de la Terre n'est qu'un élément parmi d'autres. Quant au service Climat, il n'est pas encore sur pied.

PLS

L'enjeu de *Copernicus* n'est-il pas aussi de donner à l'Europe une autonomie dans ces domaines ?

C. C. : Il existe certainement des enjeux stratégiques liés à ce programme, qui renforcera la place de l'Europe dans plusieurs domaines clefs. Grâce à *Copernicus*, l'Europe deviendra sans doute dans quelques années le leader mondial dans l'observation de la Terre. Les États-Unis sont loin d'avoir un système similaire, et leur flotte de satellites est vieillissante et peu coordonnée. Je collabore depuis 15 ans avec des scientifiques de la NASA et de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). Au début, cela me permettait de profiter des données et de l'expertise de mes collègues américains. Mais depuis trois ou quatre ans, la collaboration a changé de sens : ce sont eux qui sont en demande de nos données et de nos codes de traitement.

PLS

Une innovation du programme *Copernicus* est que les données seront publiques. Pourquoi ?

C. C. : C'était une volonté dès le départ. L'Union européenne et l'Agence spatiale européenne ont alloué cette année 3,78 milliards d'euros au programme *Copernicus*. Cela s'ajoute aux 3,4 milliards d'euros déjà investis depuis une dizaine d'années. L'Europe espère évidemment des retours scientifiques et industriels directs, mais aussi des retours *via* les futurs utilisateurs des services. Le pari est que le libre accès aux données dans un format « prêt à l'emploi » suscitera de nombreuses utilisations et favorisera la création de services ajoutés (services d'alerte, de visualisation, applications éducatives, etc.). Selon des études commandées par l'Union européenne, les applications dérivées du programme *Copernicus* pourraient entraîner la création de 80 000 emplois en Europe d'ici 2030, et chaque euro investi produira quatre euros en retour. ■

Propos recueillis par Philippe RIBEAU-GÉSIPPE

UNE CONSTELLATION DE SENTINELLES

Le lancement des satellites *Sentinel* du programme *Copernicus* s'étalera jusqu'à la fin de la décennie. Un précurseur de *Sentinel-5* sera lancé dès 2016 pour combler le manque de données atmosphériques depuis la fin de la mission *Envisat* en 2012.

Lancement — Instrument — Périodicité — Observations

SENTINEL-1
- 1A : lancé – 1B : 2015
- Radar
- Maximum 12 jours
- Surveillance des glaces, mouvements des sols

SENTINEL-2
- 2A : 2015 – 2B : 2016
- Imageur
- 2 à 5 jours
- Agriculture, érosion des sols, volcanisme

SENTINEL-3
- 3A : 2015 – 3B : 2016
- 5 instruments
- 2 jours
- Température, topographie, végétation/couleur (terre et mer)

SENTINEL-4
- D'ici la fin de la décennie
- Spectromètres UV/visible et infrarouge proche
- Géostationnaire (observations toutes les 30 à 60 minutes)
- Pollution atmosphérique, rayonnement solaire

SENTINEL-5
- D'ici la fin de la décennie
- Spectromètres UV/visible et infrarouge proche
- 1 jour
- Pollution atmosphérique, rayonnement solaire, climat

SENTINEL-6 (EN DISCUSSION)
- Non défini
- Altimètre radar
- Non défini
- Niveau des mers

HOMO SAPIENS INFORMATICUS chronique de Gilles Dowek

La lunette de l'anthropologue

Les réseaux d'ordinateurs sont aujourd'hui aux sciences humaines et sociales ce que la lunette de Galilée fut à l'astronomie.

Beaucoup de domaines de la connaissance et de l'activité humaines sont métamorphosés par les apports de l'informatique, mais ce qui rend ces transformations intéressantes est que chacune est particulière.

Dans le domaine des sciences humaines, la transformation la plus ancienne est la possibilité, apportée par l'informatique, de modéliser des phénomènes jusque-là rétifs à la modélisation. Depuis les années 1950, nous savons par exemple qu'il est possible de décrire la grammaire d'une langue sous la forme d'un algorithme et qu'une telle description donne à la grammaire décrite un caractère prédictif, donc réfutable. Modéliser, simuler, confronter les prédictions du modèle aux observations est aujourd'hui devenu une méthode courante dans certaines branches des sciences humaines, qui sont à rapprocher ici des sciences de la vie, elles aussi avides de nouveaux langages de modélisation.

Mais une deuxième transformation a débuté, qui est quant à elle à rapprocher d'une transformation récente des mathématiques.

Dans l'histoire de nombreuses sciences, on distingue deux périodes, séparées par l'introduction des premiers instruments. Il y a ainsi une astronomie à l'œil nu, jusqu'à la lunette de Galilée, puis une astronomie instrumentée, une biologie à l'œil nu jusqu'au microscope de Van Leeuwenhoek, puis une biologie instrumentée, etc. Les mathématiques sont longtemps restées l'une des rares sciences à ne pas utiliser d'instruments ; jusqu'à ce que, au milieu des années 1970, Kenneth Appel et Wolfgang Haken démontrent un théorème (celui dit des quatre couleurs) en utilisant un ordinateur. L'ordinateur est la lunette du mathématicien.

Les sciences humaines, quant à elles, ont longtemps utilisé peu d'instruments, même si l'un des ancêtres de l'ordinateur a été construit par l'Américain Herman Hollerith en 1887 pour dépouiller un recensement, c'est-à-dire pour instrumenter la démographie. Malgré cette exception, la collecte à l'œil nu des données a longtemps demandé aux ethnographes, linguistes, psychologues, etc. un patient et minutieux travail de terrain.

Rien ne garantit que les interactions humaines en ligne soient identiques aux interactions hors ligne.

Cette situation change, car nous prenons conscience de l'existence d'un instrument qui permet d'observer les interactions sociales. Cet instrument n'est ni la lunette ni l'ordinateur, mais le réseau d'ordinateurs. En effet, beaucoup de nos interactions sociales sont aujourd'hui véhiculées par un tel réseau et, chaque fois que nous apprenons, travaillons, achetons, séduisons, etc. en utilisant un tel réseau, nous y laissons des traces qui constituent un précieux matériau pour les chercheurs. Par exemple, quand un enseignant se demandait naguère si tel ou tel exercice permettait de mieux faire comprendre telle ou telle notion, il ne pouvait se fonder que sur sa longue expérience, ou réaliser une expérience avec un échantillon statistique de quelques dizaines d'élèves. Il peut désormais aussi utiliser les données collectées par les plate-formes d'enseignement en ligne, et se fonder ainsi sur un échantillon statistique beaucoup plus vaste.

Ces nouvelles méthodes posent de nouvelles questions auxquels les chercheurs devront demain – et peut-être dès aujourd'hui – apporter des réponses. La première est celle des limites que l'éthique de la recherche impose à ce genre de collecte de données. Si l'observation statistique du comportement humain est possible, les réseaux permettent aussi celle du comportement d'une personne particulière, qui peut constituer une grave intrusion dans sa vie privée.

Une deuxième est que rien ne garantit que les interactions humaines en ligne soient identiques aux interactions hors ligne. Mais rien ne garantit non plus que les mœurs des Samoanes soient identiques en présence de l'ethnographe qui les consigne et en son absence. Car, dans les sciences humaines comme ailleurs, l'observation perturbe toujours le système observé. ■

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

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES chronique de Gérald Bronner

Pourquoi les soucoupes volantes n'existent pas

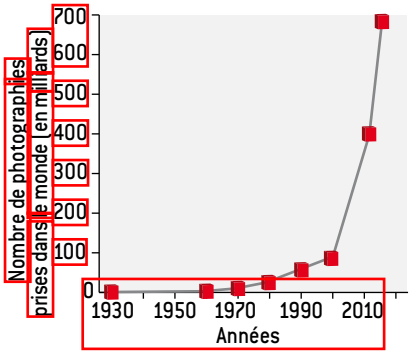
Le nombre d'« observations » d'OVNI devrait suivre la courbe exponentielle du nombre des photographies prises depuis les années 1950, ce qui n'est pas le cas.

En 2013, le ministère britannique de la Défense a fermé le bureau de renseignement qui était chargé des recherches concernant le phénomène OVNI. Une partie des réseaux sociaux a ricané, une autre s'en est émue en criant parfois au complot.

Qu'en penser ? Si l'histoire de la littérature n'a pas attendu le XX^e^ siècle pour évoquer la possibilité d'une intelligence extraterrestre, c'est en 1947 que, pour la première fois, le terme « soucoupe volante » est évoqué par Kenneth Arnold. Ce riche industriel américain s'envola le 24 juin 1947, avec son avion personnel. Il survolait les Monts Cascade de l'État de Washington lorsqu'il aperçut neuf appareils volants. Ils avaient une forme discoïdale à l'avant et triangulaire à l'arrière. Il ne put les suivre dans la mesure où ils lui paraissaient voler à quelque 2 000 kilomètres par heure ! Arnold eut le sentiment qu'ils rebondissaient dans l'atmosphère comme des « soucoupes » le feraient sur un lac. Son témoignage fit le tour du monde. Et ce sont bien des soucoupes volantes que des milliers de personnes prétendirent voir peu après, plutôt que des engins ressemblant à la description d'Arnold !

Ces observations affluent souvent par vagues. Après le témoignage d'Arnold, une première vague de phénomènes fut déclarée aux États-Unis, puis, quelques années plus tard, l'épidémie toucha la France. Si l'intérêt pour le phénomène OVNI précède généralement les vagues d'observations, c'est que plus grand est le nombre de regards tournés vers le ciel, plus grandes sont les chances de prendre des vessies pour des lanternes.

Cette interprétation paraît attestée par le fait que les statistiques effectuées entre 1947 et 1995 montrent que le mois de l'année où les témoignages sont les plus abondants est juillet, tout simplement parce que nous passons plus de temps dehors à cette saison et que cela augmente la proportion d'observateurs sincères de nuages aux formes bizarres, de satellites ou de ballons sondes qui seront pris par certains pour ce qu'ils ne sont pas.



Mais, répondraient ceux qui « veulent y croire », pourquoi ne pas supposer que plus il y a d'observateurs, plus les chances sont importantes de déceler l'existence de discrets visiteurs extraterrestres ?

Si c'était le cas, les preuves de l'existence de vaisseaux extraterrestres auraient explosé, parce que le nombre de photographies prises dans le monde a suivi une courbe exponentielle *(voir le graphe)*. Le développement des téléphones portables en mesure de prendre des photographies explique en partie ce phénomène spectaculaire. Par conséquent, puisque le nombre de possibilités d'enregistrer le réel et de verser ces enregistrements sur Internet a progressé de façon exponentielle, les preuves auraient dû faire de même. Or ce n'est pas ce que l'on constate. Pour la France, par exemple, on a enregistré des pics d'observations de ces phénomènes : en 1954 (après la vague américaine) ou en 1976 (époque où Jean-Claude Bourret, présentateur du journal télévisé, popularisa le thème OVNI) qui tiennent à des modes. Ainsi, malgré la multiplication des appareils qui nous permettraient d'apporter des témoignages adossés à des preuves, on n'enregistre pas de frémissement notable de preuves de l'existence de visiteurs spatiaux à partir des années 2000.

Plusieurs hypothèses sont possibles. On peut d'abord supposer qu'il est probable que les soucoupes volantes n'existent pas. On peut ensuite considérer que les extraterrestres ont pris conscience de notre développement technologique (le téléphone portable) et qu'ils se montrent moins (mais un peu tout de même, car il demeure des observations). Enfin, supposer que les extraterrestres ont développé, conjointement à la multiplication des appareils photo, une technologie de furtivité accrue (mais une fois de plus imparfaite, car ils sont vus de temps en temps).

En toute raison, il n'est pas possible d'apporter une réponse définitive à ces questions, mais tous ceux qui savent qu'en science on doit privilégier la parcimonie interprétative devineront à quelle hypothèse il convient raisonnablement de donner crédit. ■

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

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

Lu sur SciLogs.fr
La plateforme de blogs scientifiques de Pour la Science

Enseigner le numérique à l'école, une nécessité

par Thierry Vieville, sur le blog *Intelligence mécanique*

Dans un article publié récemment sur le blog Internetactu (http://bit.ly/1n58dj0), son rédacteur en chef Hubert Guillaud s'insurge contre l'enseignement de l'informatique à l'école et, si l'on suit son raisonnement jusqu'au bout, contre l'intérêt même de faire comprendre à chaque enfant les fondements scientifiques des technologies numériques.

L'argument principal est que « aussi omniprésente que soit une technologie, nous n'avons pas besoin de savoir comment elle fonctionne ». C'est effectivement l'argument des multinationales du secteur numérique, qui nous expliquent que leurs produits sont si faciles à utiliser qu'il suffit de les consommer. Ce raisonnement n'est sans doute pas étranger au fait que la France est aujourd'hui complètement dominée dans le secteur mondialisé du numérique.

Mais cela va plus loin. Ne pas vouloir comprendre comment le numérique fonctionne est une régression intellectuelle. Dès lors qu'il leur serait refusé de s'initier aux fondements scientifiques des technologies numériques, les jeunes ne pourraient en construire que des représentations « mythiques ».

Or que se passerait-il dans une société sans éducation au numérique ? Le savoir numérique ne serait que de la mémorisation. Sans comprendre les lois sous-jacentes, on ne peut rien inférer, mais seulement réciter. Le savoir-faire numérique ne serait que de la répétition : sans comprendre comment cela fonctionne, on ne peut pas innover. Et le savoir-être numérique serait limité à la consommation. Gageons que, comme dans d'autres domaines, le vide laissé par le manque de connaissances sur le numérique serait comblé par des « maîtres à penser », qui sauront construire un discours rassurant.

Sans éducation au numérique, nos enfants n'auront pas la possibilité d'être acteurs de la construction de leur environnement numérique, et donc de la société qui sera la leur demain. Ils devront se contenter de subir. La liberté numérique finit là où l'ignorance informatique débute.

Mais quels sont au juste les arguments avancés contre l'enseignement du numérique à l'école ? Premièrement, au motif que l'informatique requiert une nouvelle façon d'enseigner – le tableau noir et les livres ne sont pas suffisants ! – , il faudrait surtout s'intéresser aux nouvelles façons d'enseigner, sans s'encombrer d'informatique. Cet argument suppose que le résultat de l'éducation est secondaire et que seule compte la méthode pédagogique. Pour ma part, peu m'importe la méthode, je fais confiance aux femmes et aux hommes dont c'est le métier d'enseigner pour former les jeunes générations.

La liberté numérique commence là où l'ignorance informatique finit.

Par ailleurs, c'est oublier que l'apprentissage de l'informatique fait l'objet d'études pluridisciplinaires précises depuis plusieurs années, tant en France (citons le laboratoire Sciences, techniques, éducation, formation de l'École normale supérieure de Cachan) qu'à l'international. Reposer sans cesse la question de ce « que serait un enseignement de l'informatique dans le cadre de l'école, et pour apprendre quoi » est en fait obsolète : on le sait, et on est déjà en train de l'enseigner, en terminale S en France ainsi que dans d'autres pays européens.

Second argument : il y aurait « d'autres façons de soutenir l'apprentissage de l'informatique que de passer par la création d'un nouveau contenu disciplinaire avec des enseignants spécialisés ». Certes. Mais pourquoi rejeter d'emblée un outil existant qui garantit à tous un enseignement gratuit et de qualité, l'Éducation nationale ?

Réduire les excellentes initiatives extrascolaires d'éducation au numérique (*Magic Makers*, *École 42*, *Simplon.co*, etc.) à des alternatives à l'éducation nationale, c'est se tromper d'un facteur 1 000. Ces initiatives touchent quelques milliers de jeunes de 13 à 18 ans, alors que plusieurs millions sont concernés !

La question n'est pas de savoir comment éduquer « des jeunes » au numérique, mais comment éduquer des millions de jeunes au numérique. Et refuser la mise en place d'un enseignement généralisé, c'est proposer que seuls des privilégiés bénéficient de cette éducation, par des activités périscolaires ou dans les établissements favorisés.

L'apprentissage pour tous de la science informatique est indispensable. Mais est-il réalisable ? Des arguments tels que « c'est trop cher », « les professeurs n'y arriveront pas » ou « cela se fera au détriment d'autre chose » ne tiennent pas devant les retours d'expérience : l'enseignement de la science informatique a été introduit depuis 2012 comme spécialité en classe de terminale S pour un coût minime et avec succès. Et ce sans empiéter sur les autres spécialités. Il ne reste plus qu'à le généraliser progressivement, au rythme des moyens disponibles et de la formation continue des enseignants. ■

Thierry VIEVILLE est directeur de recherche en neurosciences computationnelles à l'Inria et auteur du blog Intelligence mécanique http://www.scilogs.fr/intelligence-mecanique

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

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

© Ulf Hansen/shutterstock.com

DOSSIER

Réinventer le vivant

Quels enjeux pour la biologie de synthèse ?

Fabriquer des formes minimales de vie, explorer de nouveaux codes génétiques, modifier génétiquement des organismes pour qu'ils produisent de nouvelles fonctions, concevoir et construire un génome synthétique viable… Ces dernières années, les projets de recherche renouvelant les approches de l'origine de la vie et de la compréhension du vivant se multiplient, suscitant enthousiasme et débats.

Depuis les années 1990, avec l'avènement du séquençage massif et de la bio-informatique, la recherche en biologie a amorcé un tournant. De nouvelles disciplines ont émergé. La biologie des systèmes utilise l'ensemble des données collectées sur un organisme, un organe ou une cellule afin de modéliser le fonctionnement de systèmes vivants dans leurs moindres détails. La biologie de synthèse, avec l'aide de la biologie des systèmes et de l'ingénierie, vise à concevoir des systèmes complexes fondés sur le vivant ou inspirés du vivant, et dotés de fonctions absentes dans la nature.

Que permet aujourd'hui la biologie de synthèse ? Quels sont ses objectifs, ses applications à court et moyen termes, ses limites ? Quels sont ses impacts sur la société ? Telles sont les questions qu'abordent les trois articles de ce dossier, à travers un exemple de biologie des systèmes *(voir l'article de Markus Covert, page 20)*, une présentation de la biologie de synthèse *(voir l'article de François Képès, page 28)* et une réflexion sur la façon dont les sciences sociales pourraient accompagner cette discipline émergente *(voir l'article de Pierre-Benoit Joly et Benjamin Raimbault, page 36)*. Comprendre ces nouvelles approches de la biologie est une étape indispensable pour mesurer les enjeux et les risques potentiels associés.

– Marie-Neige Cordonnier

Simuler une cellule vi

Markus Covert

Des biologistes ont conçu un modèle numérique d'un organisme unicellulaire, reproduisant son cycle de division. Cet outil éclaire d'un jour nouveau les mécanismes du vivant.

L'idée m'est venue un soir de février 2008, alors que je rentrais du travail à vélo. Je ressassais un problème qui me préoccupait, ainsi que d'autres, depuis plus d'une décennie : existait-il un moyen de simuler la vie – avec toute la complexité de la biochimie qui la rend possible – à l'aide d'un logiciel ?

Un modèle numérique de cellules vivantes, même approximatif et imprécis, serait un outil fort utile. Grâce à lui, les biologistes testeraient des idées d'expériences avant d'engager du temps et de l'argent à les mettre en pratique en laboratoire. Les concepteurs de médicaments accéléreraient la recherche de nouveaux antibiotiques en testant virtuellement leur efficacité. Les bio-ingénieurs transplanteraient et reconnecteraient les gènes de micro-organismes virtuels afin de développer des souches modifiées présentant des caractéristiques données, telles que la capacité d'émettre un rayonnement en cas d'infection par certains virus ou d'extraire de l'hydrogène gazeux du pétrole. Ces essais virtuels permettraient de limiter les risques associés à la modification de micro-organismes réels. À terme, avec des modèles assez élaborés pour simuler les cellules humaines, ces outils transformeraient la recherche médicale en offrant la possibilité de réaliser des études aujourd'hui inenvisageables parce que nécessitant des types de cellules humaines que l'on ne sait pas cultiver en laboratoire.

Une piste pour modéliser la vie ?

Toutefois, sans un moyen concret de démêler l'écheveau de réactions chimiques et d'interactions physiques qui se déroulent dans les cellules, ce rêve semblait inaccessible. De nombreuses tentatives, dans mon laboratoire et ailleurs, s'étaient heurtées à divers obstacles. Mais ce soir-là, en pédalant, j'ai repensé à des enregistrements vidéo de cellules vivantes isolées que j'avais

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

vante

LE CYCLE D'UNE CELLULE (vue d'artiste). Le contenu de la cellule est dupliqué, puis la cellule se resserre en son milieu jusqu'à former deux cellules filles identiques.

André Kuschnerauel

L'ESSENTIEL

- **Un modèle numérique reproduisant le fonctionnement d'une cellule offrirait une nouvelle compréhension du vivant.**
- **Une simulation complète d'une bactérie infectieuse commune a été réalisée l'année dernière.**
- **Les bio-informaticiens élaborent à présent des modèles pour des organismes plus complexes. Leur objectif à long terme : simuler une cellule humaine.**

effectués récemment. Et la solution m'est apparue : pour construire un simulateur réaliste fonctionnel, il fallait prendre comme modèle un microbe unicellulaire unique, choisi parmi les plus simples. Limité à une seule cellule, le problème serait en principe assez simplifié pour permettre d'inclure tous les processus biologiques connus de cette cellule : le déroulement de chaque boucle d'ADN, la transcription de chaque message de cet ADN en une copie sous forme d'ARN, la fabrication de chaque protéine obtenue à partir de ces instructions, et les interactions de tous ces acteurs et bien d'autres, tout cela participant à la croissance de la cellule et à sa division en deux cellules filles. En somme, la simulation reproduirait, à partir de considérations générales, toutes les péripéties d'une vie unicellulaire.

Dans les tentatives passées, on avait toujours essayé de simuler une colonie de cellules, car presque toutes les données sur le comportement cellulaire avaient été recueillies à partir de populations cellulaires. Mais les avancées en biotechnologie et en informatique ont facilité l'étude de cellules isolées. Aussi disposions-nous désormais des outils nécessaires pour une autre approche.

À peine arrivé chez moi, j'ai esquissé les plans d'un simulateur d'une cellule simple, la bactérie *Mycoplasma genitalium*. Le lendemain matin, je me suis attelé à l'écriture du code de quelques-uns des nombreux processus qui ont lieu au sein d'un micro-organisme vivant. En moins d'une semaine, j'avais achevé plusieurs modules prototypes, chacun représentant un processus cellulaire particulier. Les modules produisaient des résultats qui semblaient tout à fait réalistes.

J'ai montré mes travaux à quelques biologistes. La plupart ont pensé que j'avais perdu la tête, mais j'ai persisté dans mon idée. Deux doctorants, Jonathan Karr et Jayodita Sanghvi, se sont joints au projet. Réaliser un tel modèle nécessitait

de concevoir des dizaines de modules à partir des données scientifiques. Concrètement, cela signifiait passer au peigne fin les données biochimiques de près d'un millier d'articles scientifiques, puis d'utiliser les valeurs collectées pour contraindre et ajuster des milliers de paramètres, tels que l'affinité des enzymes avec leurs cibles ou la fréquence de liaison et de décrochage des protéines qui « lisent » l'ADN. Même avec l'aide de collaborateurs, le projet prendrait des années ! Mais j'avais bon espoir.

Les 400 gènes essentiels du mycoplasme

Nous nous sommes inspirés des premières recherches visant à modéliser la vie. En 1984, Harold Morowitz, alors à l'Université Yale, avait ouvert la voie. Pour lui, il fallait commencer par modéliser les bactéries les plus simples que l'on savait cultiver, les mycoplasmes. Minuscules et relativement simples, ces bactéries ont un intérêt particulier : deux espèces déclenchent des maladies humaines, le parasite à transmission sexuelle *M. genitalium*, qui colonise les voies urinaires et génitales, et le germe *Mycoplasma pneumoniae*, qui peut entraîner une pneumonie atypique. Un modèle de l'une ou l'autre espèce aurait un intérêt tant biologique que médical.

La première étape, selon H. Morowitz, devait être le séquençage du génome du microbe choisi. En 1995, J. Craig Venter et ses collègues de l'Institut pour la recherche génomique ont mené cette tâche à bien pour *M. genitalium*, qui ne compte que 525 gènes (une cellule humaine en a plus de 20000).

Quatre ans plus tard (j'étais alors étudiant en thèse à San Diego), l'équipe de J. C. Venter concluait que seuls environ 400 de ces gènes sont essentiels à la vie de cette espèce (tant que les mycoplasmes sont cultivés dans un milieu riche). J. C. Venter et ses collègues ont alors synthétisé les gènes essentiels d'une espèce de mycoplasme et montré qu'ils étaient fonctionnels dans une cellule.

Pour moi et d'autres jeunes biologistes de la fin des années 1990, ce groupe était comme Led Zeppelin : des personnalités iconoclastes, remarquables, jouant une musique que personne n'avait entendue jusque-là. Clyde Hutchinson, un biologiste du groupe, a prédit que le test ultime de notre compréhension des cellules simples serait la modélisation informatique de l'une d'elles : on peut construire une cellule fonctionnelle en laboratoire en combinant des éléments sans comprendre dans le détail comment ils s'assemblent. Ce n'est pas le cas en informatique.

H. Morowitz aussi avait appelé de ses vœux la construction d'un simulateur de cellule fondé sur les données du génome de *M. genitalium*. Selon lui, toute expérience réalisable en laboratoire l'est aussi sur un

Les grandes étapes de la modélisation cellulaire

Le long parcours de l'auteur pour aboutir à la première modélisation d'une cellule unique d'une simple bactérie, *Mycoplasma genitalium*, a été nourri des travaux théoriques, des études génétiques et des essais de modélisation d'autres chercheurs, dont voici les principaux. Concevoir un modèle numérique de cellule humaine sera encore plus difficile : une cellule humaine contient presque 40 fois plus de gènes qu'une bactérie, regroupés en chromosomes dont la structure et les informations contenues sont bien plus complexes. Quelques étapes essentielles pour y parvenir sont proposées à la fin de cette chronologie.

1967
Francis Crick et Sydney Brenner proposent le « Projet K : la solution complète d'*Escherichia coli* », une initiative visant à dresser le « patron » de cette bactérie digestive commune, y compris des détails fins de sa génétique, de ses processus énergétiques et de sa reproduction.

1984
Harold Morowitz, alors à l'Université Yale, présente les grandes lignes d'un plan de séquençage, puis de modélisation d'un mycoplasme.

1984
Une équipe menée par Michael Schuler de l'Université Cornell présente un modèle informatique utilisant des équations différentielles pour traduire la plupart des processus biologiques majeurs intervenant dans la croissance d'une cellule *E. coli*. Le modèle n'est cependant pas en mesure d'inclure l'activité des gènes, car le génome d'*E. coli* n'a pas encore été séquencé.

1989-1990
Bernhard Palsson de l'Université du Michigan publie un modèle complet du métabolisme d'un globule rouge humain qui inclut les effets des variations de l'acidité et de l'hypoglycémie.

1995
J. Craig Venter, de l'Institut TIGR, et ses collègues achèvent le séquençage du génome de *M. genitalium*.

1999
Masaru Tomita et ses collaborateurs de l'Université Keio au Japon construisent *E-Cell*, un système de modélisation de cellule fondé sur des équations différentielles et incluant 127 gènes, la plupart issus de *M. genitalium*.

2002
L'Alliance pour la signalisation cellulaire, une vaste collaboration d'une cinquantaine de chercheurs, lance un projet ambitieux évalué à dix millions de dollars sur dix ans : modéliser certaines cellules de la souris (les lymphocytes B du système immunitaire et les cellules du muscle cardiaque). Le projet produit des données intéressantes, mais se heurte aux difficultés de culture des lymphocytes B.

2002
B. Palsson, George Church de l'Université Harvard, l'auteur et d'autres conçoivent un modèle à l'échelle génomique du métabolisme d'*Helicobacter pylori*, une bactérie qui infecte l'homme et peut entraîner des ulcères gastriques et un cancer de l'estomac.

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

ordinateur. Le degré de correspondance entre les résultats expérimentaux et les simulations est une mesure de la validité de la biologie moléculaire actuelle, c'est-à-dire de la théorie expliquant comment l'ADN et les autres biomolécules de la cellule interagissent et donnent naissance à la vie telle que nous la connaissons. En d'autres termes, à mesure que nous assemblons le puzzle de la vie apparaissent de façon plus claire les pièces et les interactions qui manquent à notre théorie.

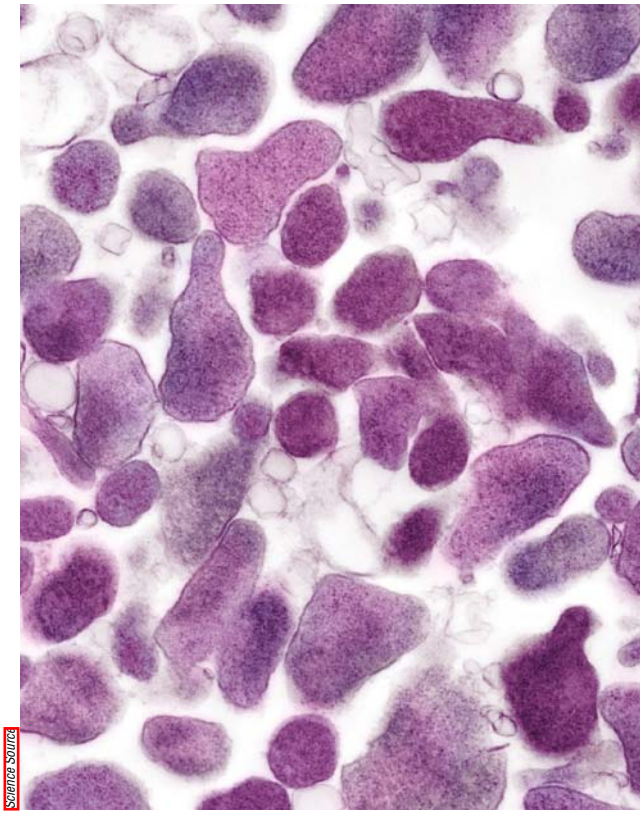
Les séquenceurs à haut débit et les équipements robotiques des laboratoires ont accéléré la recherche des pièces manquantes. Toutefois, les masses récoltées de séquences d'ADN et d'informations sur l'activité des gènes n'étaient pas (et ne sont toujours pas) accompagnées d'explications sur la façon dont ces activités se combinent. C'est en partie pour cela que, malgré l'annonce régulière de la découverte de nouveaux gènes associés au cancer, à l'obésité ou au diabète, les traitements curatifs de ces maladies restent hors d'atteinte. Seule la compréhension des nombreuses interactions moléculaires à l'origine de ces maladies conduira à ces traitements.

Les pionniers de la modélisation cellulaire ont compris que les simulations de cellules entières, avec leurs composants et leur réseau d'interactions, seraient de puissants outils pour comprendre ces données incomplètes et désordonnées. Un simulateur de cellule entière transformerait un jeu complet d'hypothèses sur le fonctionnement d'une cellule en un ensemble d'algorithmes mathématiques rigoureux.

Certes, la route était encore longue : il ne suffisait pas de savoir que tel facteur X régule le gène Y pour traduire ce processus en langage de programmation. Il manquait des précisions. Les programmeurs expriment les processus sous forme d'équations, dont l'une des plus simples est $Y = aX + b$. De telles équations nécessitent d'avancer

L'AUTEUR

Markus COVERT est professeur assistant de génie biologique à l'Université Stanford, où il dirige un laboratoire dédié à la biologie des systèmes.



Science Source

LA BACTÉRIE UNICELLULAIRE *Mycoplasma genitalium (en violet)* **est l'un des organismes vivants les plus simples. Cela ne signifie pas pour autant qu'il soit facile de modéliser son cycle de vie…**

2004
B. Palsson et l'auteur publient, avec trois autres chercheurs, un modèle informatique des 1010 gènes intervenant dans la régulation du métabolisme et de la transcription de l'ADN d'*E. coli* et montrent que le modèle prédit avec précision les résultats des expériences réalisées sur les bactéries réelles.

2012
L'auteur et ses collègues publient un modèle de cellule entière de *M. genitalium* qui, pour la première fois, simule tous les gènes et processus chimiques connus dans un organisme qui s'autoréplique.

2013
L'auteur et ses collègues montrent que le modèle prédit avec précision l'activité de plusieurs enzymes.

ET APRÈS ?

- Concevoir un modèle de cellule entière pour une bactérie plus classique et mieux étudiée, telle *E.coli*.
- Modéliser un organisme eucaryote unicellulaire tel que la levure *Saccharomyces cerivisiae*. Dans une telle cellule, l'ADN est contenu dans un noyau entouré d'une membrane, et non libre comme dans une bactérie.
- Construire un modèle de cellule animale facile à cultiver en laboratoire, tel un macrophage (un type de cellule immunitaire) de souris.
- Construire un premier modèle de cellule humaine, sans doute, là encore, un macrophage.
- Modéliser d'autres types de cellules humaines, en particulier celles jouant un rôle important dans les maladies communes.

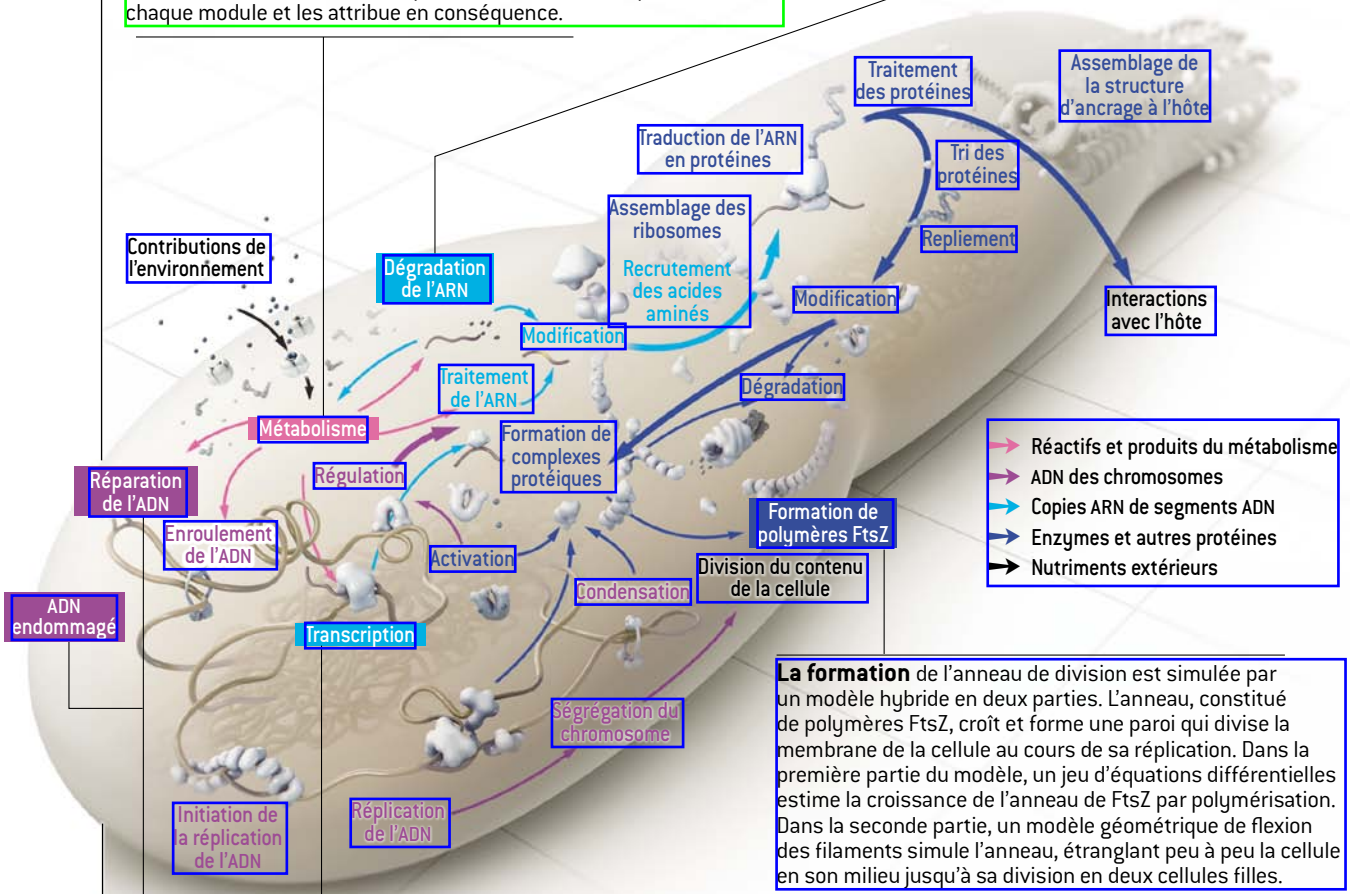
LE PRINCIPE DU SIMULATEUR

L'auteur a mis au point un modèle numérique de la bactérie infectieuse *Mycoplasma genitalium* qui représente presque tous les aspects de la vie, de la croissance et de la reproduction de ce microbe. Aucune approche mathématique ne permet de simuler toutes les fonctions biologiques de la cellule, si bien que ces fonctions ont été divisées en 28 modules distincts *(indiqués dans la cellule ci-dessous)* qui interviennent dans le traitement de l'ADN *(en violet)*, de l'ARN *(en bleu clair)*, des protéines *(en bleu foncé)*, et de l'énergie, des nutriments et des déchets *(en rose)*. Pour chaque module, les chercheurs ont sélectionné la méthode mathématique la plus appropriée *(voir ci-dessous quelques exemples de ces méthodes)*.

Au début du programme, tous les modules tournent selon une séquence aléatoire, l'ensemble simulant une seconde de temps réel. Beaucoup des valeurs d'entrée sont tirées d'un grand tableau de variables représentant leurs états initiaux, d'autres sont sélectionnées à partir de fourchettes ou de calculs de probabilités. Les chercheurs peuvent simuler différents scénarios en modifiant la configuration de départ.
Après ce premier pas, le programme met à jour le tableau de variables afin de refléter les sorties des modules. La séquence tourne alors pour un nouveau pas d'une seconde, met à jour le tableau, etc. La boucle continue jusqu'à ce que la cellule se divise, meure ou devienne trop vieille pour avoir un sens.

Le métabolisme des nutriments et des déchets est modélisé en utilisant l'analyse du bilan des flux. Cette méthode exploite des techniques de programmation linéaire pour calculer les vitesses de réaction qui optimisent la croissance, la production d'énergie ou toute autre caractéristique choisie par le modélisateur. Elle suppose que les réactions ont lieu assez vite pour obtenir un état stationnaire pendant la seconde correspondant à un pas de simulation. Afin d'empêcher les premiers modules d'utiliser des substances dont d'autres modules ont besoin, le simulateur estime la part de ces ressources qui revient à chaque module et les attribue en conséquence.

La dégradation et le recyclage de l'ARN et des protéines sont modélisés en utilisant des processus de comptage dits de Poisson. Ces processus utilisent un générateur de nombres aléatoires et des fonctions de probabilité pour décider si un fragment donné d'ARN ou de protéine se dégrade ou persiste jusqu'au pas suivant.



La formation de l'anneau de division est simulée par un modèle hybride en deux parties. L'anneau, constitué de polymères FtsZ, croît et forme une paroi qui divise la membrane de la cellule au cours de sa réplication. Dans la première partie du modèle, un jeu d'équations différentielles estime la croissance de l'anneau de FtsZ par polymérisation. Dans la seconde partie, un modèle géométrique de flexion des filaments simule l'anneau, étranglant peu à peu la cellule en son milieu jusqu'à sa division en deux cellules filles.

La transcription et la traduction des gènes (étapes au cours desquelles sont fabriquées de nombreuses protéines nécessaires à la croissance et la réplication des cellules) sont simulées par des algorithmes en plusieurs parties incluant des modèles de Markov (ces modèles suivent dans le temps l'état des enzymes qui copient les gènes en ARN), un algorithme probabiliste décrivant la fixation de ces enzymes sur l'ADN et une programmation linéaire pour distribuer l'énergie et autres ressources.

Les dommages subis par l'ADN et les réparations sont modélisés selon cette même méthode non déterministe.

AXS Biomedical Animation Studio/Source: D. T. Karr et al. (eds.) (2012)

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

des hypothèses sur les paramètres *a* et *b*. Cette exigence de précision dicte les expériences de laboratoire à mener pour combler les lacunes sur les vitesses de réaction et autres quantités caractéristiques du processus simulé.

Mais il paraissait clair aussi qu'une fois les modèles vérifiés, ils se substitueraient à certaines expériences, permettant de réserver les travaux coûteux aux questions insolubles par les simulations seules. Les expériences simulées aideraient les biologistes à définir leurs priorités, ce qui accélérerait le rythme des découvertes. Les modèles laissaient entrevoir des outils si séduisants que certains voyaient dans la simulation de cellules entières le grand défi du XXIe siècle.

Étudiant en thèse, j'ai été impressionné par les premiers résultats de ces pionniers de la modélisation cellulaire *(voir l'encadré page 22)*, et ce défi est devenu mon obsession. Plus tard, quand j'ai monté mon laboratoire et développé des techniques d'imagerie de cellules isolées, ce défi est resté dans mes pensées. Et en ce soir de février, j'ai enfin vu un moyen de le relever.

Comment contraindre et vérifier ses hypothèses ?

Afin de simuler le cycle de vie d'une espèce microbienne avec une précision suffisante pour imiter ses comportements complexes, il fallait résoudre trois problèmes. Tout d'abord, il s'agissait d'encoder sous forme de formules mathématiques et d'algorithmes toutes les fonctions importantes : le flux d'énergie, de nutriments et de produits de réactions dans la cellule (en d'autres termes, le métabolisme), la synthèse et la destruction de l'ADN, de l'ARN et des protéines, et l'activité d'une multitude d'enzymes. Ensuite, il fallait trouver un cadre global pour intégrer toutes ces fonctions. Le dernier problème, enfin, était le plus compliqué à bien des égards : fixer judicieusement les limites haute et basse de chacun des quelque 1700 paramètres du modèle.

J'ai vite compris que nous aurions beau éplucher la littérature sur *M. genitalium* et ses proches parents en quête de ces paramètres (nous avons passé deux ans à extraire les données d'environ 900 articles), il faudrait, dans certains cas, se contenter de faire des hypothèses ou d'utiliser des résultats d'expériences portant sur d'autres types de bactéries, telle *Escherichia coli*, afin d'obtenir certaines valeurs (par exemple, le temps de séjour moyen des molécules d'ARN dans la cellule avant qu'elles ne soient détruites et recyclées). Or sans un moyen de contraindre et de vérifier ces hypothèses, l'entreprise était vouée à l'échec.

C'est précisément un tel moyen qui m'est apparu ce soir d'hiver : j'ai réalisé que modéliser une cellule unique (et non un groupe de cellules, comme l'avaient fait presque toutes les études antérieures) offrait peut-être la situation recherchée. Considérons la croissance et la multiplication des cellules. Une population de cellules croît graduellement ; la naissance ou la mort d'une cellule perturbe peu cette croissance. En revanche, pour une cellule donnée, la division est un événement d'une importance capitale. Avant de se scinder en deux, l'organisme double sa masse, plus précisément les quantités d'ADN, de membrane et de toutes les protéines nécessaires à sa survie. Ainsi, si le modèle se limite à une cellule unique, l'ordinateur pourra compter et suivre chaque molécule sur tout le cycle de vie. Et il pourra vérifier les quantités lors du passage de une à deux cellules.

LES MODÈLES LAISSAIENT ENTREVOIR des outils si séduisants que certains voyaient dans la simulation de cellules entières le grand défi du XXIe siècle.

De plus, une cellule se reproduit à un rythme donné. *M. genitalium*, par exemple, se divise toutes les neuf à dix heures dans un environnement normal de laboratoire. Elle met rarement moins de six heures ou plus de 15. Le fait que le contenu entier de la cellule doive se dupliquer dans ce délai permet de choisir des fourchettes raisonnables pour de nombreuses variables qui, sinon, auraient été indéterminées, telles celles qui contrôlent le moment où commence la réplication de l'ADN.

J'ai réuni une équipe de physiciens, de biologistes, de modélisateurs et même un ancien ingénieur informaticien de *Google*, et nous avons discuté des approches mathématiques à adopter. Michael Schuler, ingénieur biomédical de l'Université Cornell, était un pionnier des simulations cellulaires fondées sur les équations différentielles. Bernhard Palsson, qui m'avait encadré lors de mes études à San Diego, avait développé une technique qui modélisait bien le métabolisme. D'autres avaient montré que le hasard est un élément important dans la transcription des gènes, ou que la division des cellules implique un changement géométrique de la membrane cellulaire.

Aucune des méthodes développées ne serait suffisante à elle seule pour modéliser toutes les fonctions d'une cellule. Nous avons donc décidé de créer un modèle de cellule entière constitué de 28 modules distincts, dont chacun utilise l'algorithme qui correspond le mieux au processus biologique concerné et à la connaissance que nous en avons *(voir l'encadré page ci-contre)*. Cette stratégie a conduit à un patchwork de procédures mathématiques. Restait à assembler les morceaux.

J'ai repensé à un cours de conception d'usine chimique que j'avais suivi à l'université. Pour le projet de fin d'année, nous avions utilisé un outil de simulation puissant nommé HYSYS pour ébaucher les plans d'une grande raffinerie. HYSYS permettait d'effectuer chaque réaction chimique principale dans un module séparé et de connecter ces modules. En d'autres termes, il offrait un cadre permettant de réunir de nombreux types d'opérations chimiques en un système ordonné et prévisible.

28 modules interconnectés

Avec quelques modifications, cette approche pouvait fonctionner pour notre simulateur de cellule, à condition de faire une hypothèse simplificatrice importante : supposer que, bien que tous les processus biologiques aient lieu simultanément dans une cellule vivante, leurs actions sont indépendantes sur des périodes inférieures à la seconde. Si cette hypothèse était viable, nous pourrions diviser la vie de la cellule en tranches d'une seconde et faire tourner chacun des 28 modules, dans l'ordre, pendant une seconde avant de mettre à jour l'ensemble des variables de la cellule. Le modèle rendrait compte de toutes les interdépendances biochimiques (par exemple, le fait que la transcription des gènes et la synthèse de l'ADN dépendent de l'énergie et des nucléotides

Un tournant de la biologie des systèmes

Le modèle « pleine-cellule » de *Mycoplasma genitalium* proposé par Markus Covert et ses collègues marque un tournant dans la jeune histoire de la biologie des systèmes.

Si l'idée de modéliser un organisme monocellulaire n'est pas nouvelle, le modèle de M. Covert est le premier à s'appuyer sur un inventaire exhaustif de gènes et à donner une représentation aussi complète que possible de leurs fonctions et des processus cellulaires dans lesquels ils sont impliqués.

Pour construire ce modèle, qui agrège une quantité considérable de connaissances, M. Covert et son équipe ont dû vaincre plusieurs difficultés. Ils ont dû créer un cadre original pour combiner des sous-modèles fondés sur des techniques de modélisation très différentes. Par ailleurs, ils ont su trouver des jeux de paramètres pour lesquels le modèle produit les bonnes proportions des différents ingrédients qu'une cellule doit accumuler pour compléter son cycle et faire une copie d'elle-même. Leur modèle produit des temps réalistes de division cellulaire et prédit correctement la viabilité d'un certain nombre de mutants.

Ce modèle est en rupture avec la tradition en ce qu'il n'est pas destiné à évaluer une hypothèse préalable spécifique. L'enjeu est d'organiser la totalité des interactions qui composent le système de sorte qu'on puisse en observer le comportement collectif. Ce n'est que dans un second temps que l'on cherchera à exploiter cet outil « panoptique » pour tester de nouvelles hypothèses.

Abandonner ainsi une modélisation d'explication pour une modélisation de navigation ne va pas de soi. On passe des principes clairs et concis d'un système à quelques variables à un système plus complexe difficile à appréhender intuitivement. Le modèle est une carte qui permet d'explorer cette complexité. De ce point de vue, il se manipule comme on le ferait du système réel, et les « faits » qu'il produit réclament une explication au même titre que des données expérimentales. Mais comme le modèle ne reflète que la connaissance imparfaite que nous avons de cet organisme, si simple soit-il, et qu'il ne la reflète qu'imparfaitement, le passage du système réel, avec ses difficultés propres, à son substitut numérique vient sans garantie de qualité. Le passage « au numérique » peut ainsi sembler une opération au bénéfice incertain dans l'état de nos connaissances.

Quoi qu'il en soit, la possibilité d'interroger le système dans sa totalité permet d'aborder de nouvelles questions. On peut par exemple étudier l'impact du niveau des ressources énergétiques sur les composants du système, ou comment offre et demande se répondent sur le « marché » de la traduction des gènes, et si des gènes répondent différemment aux conditions de cette compétition ; ou encore examiner l'influence de la densité des molécules associées à l'ADN sur l'activité transcriptionnelle du système. Le modèle pleine-cellule de M. Covert ouvre un nouveau champ d'enquête en biologie des systèmes, où l'on étudie l'interdépendance des différents processus qui composent une cellule et leur intégration fonctionnelle à l'échelle cellulaire.

– Vincent Danos
CNRS et Université d'Édimbourg (Écosse)

produits par le métabolisme), mais seulement aux échelles temporelles supérieures à la seconde.

Tout en construisant notre cellule virtuelle, nous avons intégré au logiciel des capteurs pour mesurer l'état de la cellule. Chaque lancement du simulateur, couvrant la totalité d'un cycle de vie d'une cellule, produisait 500 mégaoctets de données. En sortie, on obtenait des dizaines de graphiques et de représentations visuelles.

Au début, les résultats furent frustrants. Pendant des mois, tandis que nous corrigions le code, précisions les équations mathématiques, ajoutions de nouvelles contraintes sur les paramètres et ajustions certaines (grâce à de nouvelles données de laboratoire), la cellule refusait toujours de se diviser et se comportait de façon imprévisible. Pendant un moment, par exemple, elle a produit d'énormes quantités d'un certain acide aminé (l'alanine) et presque rien d'autre.

Et puis un jour, notre microbe cybernétique est arrivé au terme de son cycle cellulaire et s'est enfin divisé. De plus, son temps de doublement était proche de neuf heures – celui du mycoplasme réel. De nombreuses mesures étaient encore loin de la réalité, mais le succès était enfin à notre portée.

Quelques mois plus tard, la majorité des données obtenues par simulation correspondait exactement à la croissance observée d'une vraie cellule. Et le reste était fascinant : inattendu, mais biologiquement plausible. Le premier modèle numérique d'un organisme vivant entier était fonctionnel. Qu'allait-il nous apprendre ?

Modéliser la vie d'une cellule humaine ?

Aujourd'hui, après environ un an d'utilisation de ce nouvel outil, nous découvrons encore des informations passionnantes à chaque fois que nous scrutons le fonctionnement de notre micro-organisme virtuel, tandis qu'il gère des millions de détails participant à sa vie et à sa réplication. Par exemple, la fréquence à laquelle les protéines participant au décodage des gènes se décrochent de l'ADN est impressionnante : environ 30000 fois par cycle de vie de neuf heures. Nous avons aussi découvert que la période de doublement du matériel biologique lors de la division cellulaire, très stable, est en fait une propriété émergente qui découle des interactions de deux phases distinctes et indépendantes de la réplication, toutes deux de durée très variable. Et les enregistrements seconde par seconde du comportement de la cellule nous ont permis d'expliquer pourquoi sa division s'arrête net quand on inactive certains gènes, mais se poursuit encore une dizaine de fois si l'inactivation porte sur d'autres gènes essentiels : ces divisions supplémentaires se produiraient à chaque fois que la cellule a en réserve davantage de copies d'une protéine essentielle qu'elle n'en a besoin durant un cycle de vie : l'excédent est légué à ses descendantes, qui ne meurent que quand le stock est épuisé. Il faudra sans doute encore des années pour comprendre tout ce que ces simulations révèlent sur le fonctionnement des mycoplasmes et des cellules en général.

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

Nos travaux sur *M. genitalium* ne sont que la première des nombreuses étapes à franchir pour modéliser les cellules ou tissus humains à l'échelle des gènes et des molécules. Notre modèle est loin d'être parfait, et les mycoplasmes sont l'expression la plus simple de la vie autosuffisante. Nos simulations, le code source, les données expérimentales, le code de visualisation, la base de connaissances, tout est disponible gratuitement sur Internet. Avec d'autres chercheurs, nous travaillons déjà à améliorer le simulateur et à l'étendre à divers organismes, tels que la bactérie *E. coli* et la levure *Saccharomyces cerivisiae*, toutes deux des organismes utilisés fréquemment tant dans les laboratoires que dans l'industrie.

Chez ces espèces, la régulation des gènes est beaucoup plus complexe, et la localisation des événements dans la cellule joue un rôle bien plus important (la levure, par exemple, présente un noyau). Autant de problèmes à résoudre avant de s'attaquer à des cellules plus complexes encore, tels des macrophages de souris ou humains. Faciles à cultiver, ces cellules du système immunitaire seront sans doute les premières utilisées pour ajuster et valider le modèle.

Il est trop tôt pour estimer le temps que ces améliorations prendront. Comparées aux bactéries, les cellules humaines comportent beaucoup plus de compartiments. De plus, leur contrôle génétique, plus complexe que celui des mycoplasmes, demeure en grande partie mystérieux. Enfin, de par leurs rôles complémentaires dans les tissus multicellulaires, les cellules humaines interagissent plus avec d'autres types cellulaires que les bactéries.

Début 2008, modéliser la plus simple des cellules ne semblait pas pouvoir se concrétiser avant une décennie, et modéliser une forme de vie plus complexe paraissait inenvisageable. Aujourd'hui, l'idée de simuler une cellule humaine ne paraît plus si saugrenue. Et si le logiciel se révèle inapproprié, au moins cet échec mettra-t-il en lumière les nombreuses inconnues à expliciter encore sur nos propres cellules. ■

BIBLIOGRAPHIE

E. Gonçalves *et al.*, **Bridging the layers : toward the integration of signal transduction, regulation and metabolism into mathematical models,** Molecular Biosystems, vol. 9, pp. 1576-1583, 2013.

J. R. Karr *et al.*, **A whole-cell computational model predicts phenotype from genotype,** *Cell*, vol. 150, pp. 389-401, 2012.

P. L. Freddolino et S. Tavazoie, **The dawn of virtual cell biology,** *Cell*, vol. 150, pp. 248-250, 2012.

W. Gibbs, **La biologie virtuelle,** *Pour la Science* n°288, pp. 38-44, 2001.

La biologie de
vers une ingénierie

François KÉPÈS

Concevoir un génome *ab initio*, inventer une cellule minimale, produire de nouvelles fonctions biologiques… Telles sont quelques-unes des ambitions de la biologie de synthèse. Son objectif : ouvrir de nouveaux horizons en biologie en s'inspirant des méthodes de l'ingénierie.

Au début des années 1960, l'invention des circuits intégrés a métamorphosé l'ingénierie électronique : un schéma imprimé sur un masque suffisait à déposer sélectivement des couches métalliques et chimiques sur un support, et à produire ainsi le circuit imaginé. Bientôt, les ingénieurs ont puisé dans les circuits déjà conçus pour les combiner en des montages toujours plus complexes. La modélisation informatique aidant, les progrès furent considérables, conduisant aux nombreux circuits intégrés que comportent les téléphones portables, ordinateurs et autres dispositifs électroniques.

Et si une telle combinaison de technique et de méthode était transposable en biologie ? S'il était possible, en biologie aussi, de disposer d'une banque d'outils et de règles rationnelles qui, combinés selon les besoins, aideraient à comprendre le vivant en le fabriquant, ou à concevoir et produire à la demande de nouvelles fonctions biologiques n'existant pas dans la nature ? Depuis quelques années, cette idée fait son chemin parmi les biologistes. Rassemblées sous le nom de biologie de synthèse, leurs approches se construisent aux interfaces de la biologie et de l'ingénierie, avec des apports de la chimie, de la physique, des mathématiques et de l'informatique. Elles ont pour objectif d'injecter en biologie les principes fondant toute ingénierie. De quoi s'agit-il ? Quelles sont les ambitions de la biologie de synthèse ? Que permet-elle aujourd'hui ? Quelles sont ses perspectives et limites ? Telles sont les questions que nous examinerons ici.

La biologie de synthèse est à la biologie des systèmes – l'analyse des interactions des biomolécules et des comportements des systèmes biologiques – ce que la chimie de synthèse est à la chimie analytique (l'analyse des substances chimiques). Après le triomphe de la chimie analytique dans les années 1850, les chimistes se sont tournés vers la synthèse pour obtenir plus de produits naturels à analyser, puis des composés n'existant pas dans la nature. Cette recherche a donné naissance à l'industrie chimique et à la pétrochimie du XX^{e} siècle. De même, dans les années 1990, les progrès de la biologie analytique ont été considérables grâce au développement des techniques dites « -omiques » : le séquençage du génome (génomique), la cartographie des ARN (transcriptomique) ou des protéines (protéomique) d'un système biologique, ou des modifications non génétiques du génome (épigénomique)… Stimulée par un volume croissant de données, la biologie des systèmes s'est développée, attirant physiciens et informaticiens. Quelques années plus tard est apparue la biologie de synthèse, qui s'appuie sur la compréhension ainsi acquise.

La biologie de synthèse est l'ingénierie rationnelle de la biologie. En d'autres termes,

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

synthèse du vivant

elle vise à la conception rationnelle et à l'ingénierie de systèmes complexes fondés sur le vivant ou inspirés par le vivant, et dotés de fonctions absentes dans la nature. Un exemple de cette démarche est la synthèse par voie biologique de l'artémisinine, médicament antipaludéen de référence dont l'industrialisation a débuté en 2013.

Un médicament contre le paludisme

L'artémisinine est naturellement produite par une plante, l'armoise annuelle. Son usage dans le traitement du paludisme remonte à plus de deux millénaires en Chine et, depuis 2002, l'Organisation mondiale de la santé recommande son utilisation (combinée à d'autres médicaments pour prévenir le développement de résistances du parasite responsable de la maladie). L'artémisinine fait partie d'une classe de molécules naturelles produites par des plantes, les terpénoïdes, utilisées dans des secteurs aussi variés que l'alimentation (arômes), les cosmétiques (fragrances) ou certaines thérapies anticancéreuses (outre la lutte contre le paludisme). Le menthol et le camphre en sont deux exemples.

L'ESSENTIEL

- Apparue dans les années 2000, la biologie de synthèse vise à rationaliser les pratiques en biotechnologie.
- Une fonction biologique peut être vue comme un circuit génétique constitué de plusieurs modules – des gènes produisant des fonctions de base.
- En modélisant et combinant ces modules, les biologistes espèrent concevoir et fabriquer des fonctions biologiques à la demande.
- Cette approche aiderait à mieux comprendre le vivant. Ses applications potentielles sont multiples.

© Kenn Brown/Monaq Ultric Studios

Au début des années 2000, Jay Keasling, de l'Université de Californie à Berkeley aux États-Unis, et ses collègues ont cherché des méthodes alternatives de fabrication de ces molécules, dont la production naturelle était trop faible et fluctuante en qualité et en quantité. Ils se sont notamment concentrés sur l'artémisinine. La synthèse chimique demandant un grand nombre d'étapes et n'offrant elle aussi qu'un faible rendement, ils se sont tournés vers la synthèse par voie biologique, ou bioproduction. En 2013, après une dizaine d'années d'efforts, leurs travaux ont abouti à la bioproduction, par la société pharmaceutique *Sanofi*, d'environ 60 tonnes annuelles d'artémisinine de synthèse aux caractéristiques stables.

Pour parvenir à cette bioproduction, ils ont combiné plusieurs éléments : un micro-organisme connu, à croissance rapide et aisé à modifier génétiquement, des gènes issus de l'armoise annuelle et des techniques de biologie moléculaire pour optimiser l'expression des gènes. Après quelques tâtonnements, le choix s'est porté sur la levure du boulanger. Cette cellule a l'intérêt, comme d'autres cellules eucaryotes (c'est-à-dire à noyau) non végétales, de produire un précurseur de l'artémisinine. En lui ajoutant les gènes de plusieurs enzymes de l'armoise annuelle impliquées dans la production de l'artémisinine, les biologistes ont réussi à construire, dans la levure, une voie de synthèse complète d'un précurseur de l'artémisinine, l'acide artémisinique. Voie qu'ils ont ensuite améliorée en flanquant chaque gène d'une séquence (un promoteur) favorisant son expression et en effectuant quelques autres modifications raisonnées de la levure. Le rendement est ainsi passé de 1,6 à 28 grammes par litre de fermenteur.

Cette concentration élevée entraîne une précipitation du produit, une caractéristique qui permet d'extraire l'acide artémisinique durant la fermentation. Celui-ci est ensuite transformé en artémisinine par voie chimique (chimie de synthèse optimisée par photochimie).

Cet exemple illustre le principe de la biologie de synthèse : concevoir de nouveaux systèmes biologiques en combinant des biomolécules, des circuits biochimiques servant un métabolisme ou la régulation d'une fonction biologique, et des cellules ou des particules qui abriteront l'ensemble. Trois démarches la caractérisent. La première est une approche constructiviste et hiérarchique :

on part de biobriques, des segments d'ADN remplissant des fonctions définies, et on les assemble dans des dispositifs – des circuits de régulation ou métaboliques –, eux-mêmes insérés dans des cellules qui produiront les fonctions. La bioproduction d'artémisinine en est un exemple.

La deuxième démarche est, à l'inverse, déconstructiviste : on part d'un micro-organisme fonctionnel et on remplace une partie de son génome par un bout de génome de synthèse qui produit la molécule ou la fonction souhaitée. Les biologistes espèrent, à terme, réussir l'opération avec le génome entier, nous y reviendrons. La troisième démarche, enfin, consiste à concevoir et construire des systèmes vivants simplifiés, tels que des protocellules – des vésicules aqueuses fermées par une enveloppe lipidique. Des équipes cherchent aussi à synthétiser de nouveaux nucléotides (les constituants de l'ADN) et acides aminés (les constituants des protéines), jamais observés dans la nature.

Bien que ces approches soient très différentes, elles ont en commun une même volonté : fonder ces recherches sur les principes de l'ingénierie, afin de les optimiser, avec l'idée que cela facilitera l'émergence de nouvelles idées et la compréhension du vivant. Qu'est-ce que cela signifie ? Les ingénieries de systèmes électroniques ou mécaniques nécessitent des cadres bien établis pour gérer la complexité, des outils fiables pour manipuler les états du système, et des plateformes de tests. La biotechnologie, en revanche, est encore dépourvue de tels cadres, outils et plateformes. Pour mesurer la distance à parcourir, reprenons une à une les propriétés qui caractérisent toute ingénierie. Le projet immédiat de la biologie de synthèse est de raccourcir cette distance.

Une propriété fondamentale de l'ingénierie est le découplage de la conception et de la fabrication : on commence par concevoir les plans d'une voiture ou d'un circuit intégré avant de les fabriquer. Actuellement, pour développer des composants ou circuits biochimiques opérationnels, il faut suivre des protocoles compliqués de construction de fragments d'ADN, user de modèles simples pour guider la conception, et procéder par approxima-

L'AUTEUR

François KÉPÈS est directeur de recherche à l'institut de Biologie des Systèmes et de Synthèse (iSSB, *Genopole*, UEVE, CNRS) et directeur du Programme d'épigénomique à *Genopole*, à Évry. Il est professeur invité permanent au Collège impérial de Londres.

LA BOÎTE À OUTILS DE LA BIOLOGIE DE SYNTHÈSE

Si, depuis quelques années, il est possible de développer l'ingénierie rationnelle des systèmes biologiques, c'est grâce aux techniques visant à modifier les génomes. Dans le passé, ces méthodes étaient limitées à l'insertion ou à la mutation de gènes soit en des sites aléatoires, soit en des points précis du génome. Les quelques méthodes disponibles pour diriger les modifications de génomes avaient plusieurs défauts, en particulier une faible efficacité et un coût élevé en main-d'œuvre. L'essor de la biologie de synthèse s'appuie sur plusieurs progrès récents qui ont considérablement accru les capacités d'intervention dirigée et de combinaison des modifications génétiques. Voici les principaux outils utilisés aujourd'hui.

LES RECOMBINASES sont des enzymes qui permettent d'insérer de longs fragments d'ADN dans le génome en des sites spécifiques.

LES NUCLÉASES à doigts de zinc ou à domaines TAL sont des protéines dont la séquence peut être manipulée afin de cibler une séquence particulière d'ADN. Cette activité de fixation spécifique peut être associée à une autre, telle que le clivage de l'ADN ou l'interaction avec une autre protéine.

LES NUCLÉASES GUIDÉES par ARN du type CRISPR offrent plus de flexibilité que les précédentes. Les CRISPR naturels sont des systèmes immunitaires bactériens dégradant l'ADN étranger de virus. On les utilise dans nombre d'organismes pour effectuer des modifications dirigées par des molécules d'ARN conçues sur mesure.

CERTAINS INTRONS DE GROUPE II sont des éléments génétiques « égoïstes » qui s'incorporent eux-mêmes dans l'ADN hôte *via* une molécule intermédiaire d'ARN.

L'INGÉNIERIE RECOMBINOGÈNE fait appel aux propriétés des virus bactériens (les phages) pour effectuer des recombinaisons ciblées du génome, c'est-à-dire y insérer des gènes en des endroits précis.

LE GÉNIE GÉNÉTIQUE EN MULTIPLEX permet d'incorporer simultanément dans la même cellule plusieurs fragments d'ADN en différents points ciblés de son chromosome. Dans la méthode MAGE, le ciblage est effectué grâce à des fragments d'ADN que la cellule assimile à des intermédiaires de la réplication du génome lors de la division cellulaire. Ces fragments se retrouvent ainsi incorporés dans le génome.

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

tions successives suivies d'interminables réglages fins. En conséquence, le cycle de conception, fabrication et dépannage de composants et circuits biochimiques reste lent et sujet à erreurs.

Il s'agirait, dans le futur, de concevoir l'objet virtuel et de tester ses propriétés avant de le construire. Durant l'époque intermédiaire que nous vivons actuellement, ces deux phases de conception puis de fabrication, bien que distinctes, doivent en général être réitérées en raison de l'imperfection des modèles utilisés. En ce cas, les résultats des tests sur l'objet fabriqué servent à recalibrer le modèle plus près de la cible. En somme, une spirale d'amélioration passant alternativement par la conception et la fabrication doit être instaurée pour parvenir à un résultat satisfaisant.

La conception comprend la mise en place d'un modèle mathématique ; sa simulation numérique permet de modifier les paramètres jusqu'à obtenir le résultat souhaité. La fabrication comprend la construction du circuit de synthèse respectant les paramètres ainsi obtenus. La construction fait appel au génie génétique de l'ADN codant les biomolécules nécessaires *(voir l'encadré page ci-contre)* ; puis les molécules et circuits ainsi construits sont caractérisés par des tests adéquats.

Des modules biologiques indépendants

Une deuxième propriété fondatrice de l'ingénierie est l'indépendance du contexte ou orthogonalité : chaque composant électronique fonctionne de la même façon quel que soit le circuit auquel il est intégré. Dans la cellule vivante, les interactions des composants de synthèse et cellulaires sont difficiles à prédire ou à caractériser. Un circuit bien caractérisé dans une bactérie fonctionnera différemment dans une autre souche, même si elle est proche. Cela ne respecte pas le principe d'indépendance d'un circuit de synthèse par rapport à son contexte (ici cellulaire). De nombreux travaux visent à diminuer cette dépendance vis-à-vis du contexte. Un exemple en est l'introduction répétée d'isolateurs transcriptionnels de part et d'autre des gènes introduits dans la cellule. Les isolateurs sont de courtes séquences d'ADN ayant pour effet de terminer la transcription une fois que celle des gènes d'intérêt a été effectuée, afin de ne pas « contaminer » l'expression d'un gène voisin.

Au-delà de l'indépendance par rapport au contexte cellulaire se pose la question de la modularité, qui mesure l'indépendance entre les divers composants du circuit de synthèse introduit dans la cellule. La biologie de synthèse se propose de constituer des systèmes (nanoparticule, cellule) par assemblage de dispositifs (oscillateur, interrupteur, etc. *voir l'encadré page 33*), eux-mêmes réalisés à partir de briques (fragments d'ADN, protéines, ARN). La fabrication d'un objet fondé sur la biologie, ou inspiré par elle, devient donc un processus hiérarchique d'assemblage de modules. Idéalement, les propriétés de chaque module ne devraient pas dépendre du circuit de synthèse dans lequel il est immergé. Tout praticien de la biologie moléculaire sait que cet objectif est aujourd'hui lointain. Néanmoins, chaque progrès sur ce chemin sera porteur d'améliorations pour le biologiste.

Enfin, dans la dimension hiérarchique et modulaire décrite ci-dessus, la biologie de synthèse exige une normalisation des composants, nécessaire pour permettre leur assemblage en dispositifs, puis l'assemblage de ces dispositifs en systèmes. On est cependant encore loin d'atteindre une norme unique stabilisée : récemment encore, de nouveaux standards ont été proposés. De plus, il s'agit de normaliser non seulement les composants, mais aussi les dispositifs et la production biologique, sans oublier les systèmes hybrides qui combinent nanobiologie et nanoélectronique.

La normalisation concerne aussi la dimension mathématico-informatique de la biologie de synthèse. En général, deux familles de formalismes sont utilisées pour exprimer les questions scientifiques : les équations différentielles et les approches booléennes. Dans le premier cas, chaque interaction entre deux biomolécules peut être représentée par une équation différentielle qui définit la dépendance entre leurs concentrations, c'est-à-dire l'évolution après un délai court des concentrations de ces molécules dans la cellule. Souvent, la même molécule intervient dans plusieurs interactions, et sa concentration se retrouve donc dans plusieurs équations. On dit alors que les équations sont couplées. Le jeu consiste à intégrer ces équations couplées pour calculer au prochain pas de temps les nouvelles concentrations de toutes les biomolécules. On trace ainsi l'évolution temporelle de ces concentrations, c'est-à-dire le « comportement » du système.

BIBLIOGRAPHIE

N. Annaluru *et al.*, **Total synthesis of a functional designer eukaryotic chromosome**, *Science*, vol. 344, pp. 55-58, 2014.

K. M. Esvelt et H. H. Wang, **Genome-scale engineering for systems and synthetic biology**, *Mol. Syst. Biol.*, vol. 9, pp. 641-657, 2013.

C. J. Paddon *et al.*, **High-level semi-synthetic production of the potent antimalarial artemisinin**, *Nature*, vol. 496, pp. 528-532, 2013.

F. Képès, **La biologie de synthèse plus forte que la nature ?** Le Pommier, 2011.

W. Weber et M. Fussenegger, **Emerging biomedical applications of synthetic biology**, *Nature Reviews Genetics*, vol. 13, pp. 21-35, 2011.

D. G. Gibson *et al.*, **Creation of a bacterial cell controlled by a chemically synthesized genome**, *Science*, vol. 329, pp. 52-56, 2010.

SUR LE WEB

Informations générales sur la biologie de synthèse : www.biologie-de-synthese.fr

Observatoire français de la biologie de synthèse : biologie-synthese.cnam.fr

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

Dans le second cas, les approches booléennes permettent de décrire le système étudié en termes de relations logiques du type : « si *A* est vrai et si *B* est faux, alors *C* est vrai. » Il est possible d'ajouter des notions temporelles, par exemple : « si *A* se produit avant *B*, alors *C* sera toujours vrai. » Ces approches booléennes sont particulièrement efficaces lorsque les informations quantitatives complètes ne sont pas disponibles, comme souvent en biologie. Elles permettent alors des prédictions sûres, à rebours des approches différentielles qui sont plutôt utilisées pour apporter des explications scientifiques aux phénomènes observés.

En résumé, il n'y a pas de standards admis par tous pour ces formalismes ni pour les méthodes numériques associées. En revanche, il existe des standards *de facto*, c'est-à-dire quelques formalismes et méthodes répandus dans la communauté scientifique concernée. Mais il n'y a pas d'unicité de ces standards *de facto*, parce que leur choix rationnel repose sur les questions posées, les jeux de données disponibles, les observables biologiques et les objectifs de l'étude.

Quant à la normalisation de l'interface de la conception informatique et de la fabrication biomoléculaire, presque rien n'a été fait, malgré d'intéressantes initiatives de la jeune pousse américaine *Ginkgo Bioworks*. Par exemple, pour caractériser ses micro-organismes, *Gingko Bioworks* a automatisé le processus complet – une gageure, car le processus fait intervenir une succession de robots incompatibles. En pratique, des écrans décrivant le statut des échantillons vis-à-vis du processus en cours trônent sur les étagères au-dessus des paillasses entre les bouteilles de réactifs. Le résultat en est un nombre réduit d'erreurs et un meilleur contrôle de la qualité.

Pourtant, d'importants gains sont prévisibles si était développé un environnement de conception qui non seulement fournirait une interface de haut niveau commandant les robots biomoléculaires, mais aussi analyserait automatiquement les résultats des expériences et leur reproductibilité. Cette analyse servirait à améliorer le prochain plan expérimental, lui aussi numérisé. Aujourd'hui, c'est encore l'expert humain qui établit cette boucle entre résultats expérimentaux et conception de l'expérience suivante.

Pour comprendre ce que nous réserve la biologie de synthèse dans le futur, il est important de garder en mémoire son état d'esprit. En faisant des propriétés discutées ci-dessus autant d'objectifs de recherche, cet état d'esprit accélère leurs progrès au long cours. Prenons un exemple. Il y a 15 ans, nul n'aurait pensé la biologie en termes d'« indépendance vis-à-vis du contexte » ; par conséquent, aucun effort n'était réalisé en ce sens. À partir du moment où cette propriété devient une cible, des efforts sont accomplis qui, même si cet objectif reste difficile à atteindre, permettent de s'en approcher.

Malgré quelques avancées, la conception et fabrication de circuits biochimiques de synthèse réalisant les fonctionnalités souhaitées reste un artisanat spécialisé. Comme pour chaque révolution industrielle, la donne ne sera changée que lorsque ce socle conceptuel et méthodologique quittera la tour d'ivoire de quelques chercheurs très spécialisés pour devenir accessible à de nombreux ingénieurs. Cette ouverture requiert de nouveaux « outils », terme pris ici dans sa plus large acception.

1995 : Le premier génome bactérien est séquencé ; le premier long gène est synthétisé.

1999 : Le premier génome viral est synthétisé.

2000 : Il est possible de concevoir des circuits de régulation et de les implanter dans des bactéries ; le génome humain est séquencé.

2003 : Un repli protéique non naturel est conçu et réalisé.

2008 : Un génome bactérien entier est synthétisé *de novo*.

2010 : Ce génome est introduit avec succès dans une bactérie hôte capable de se reproduire.

2014 : Un chromosome réduit fonctionnel de la levure est synthétisé.

L'étape limitante : la phase de conception

Quels types d'outils – et de formations ou filières éducatives correspondantes – manquent le plus pour ouvrir à de nombreux ingénieurs ce qui est aujourd'hui du ressort de quelques équipes de recherche ? Par exemple pour que, si elle devait être refaite, une mise au point comme celle de la biosynthèse d'artémisinine ne requière que le travail durant un ou deux ans d'une équipe réduite, qualifiée certes, mais dont l'expertise ne soit pas quasi unique à l'échelle mondiale ?

La biologie de synthèse fait appel à des méthodes provenant de deux catégories : des méthodes biomoléculaires et d'autres, mathématico-informatiques. La phase de fabrication relève des méthodes biomoléculaires, qui font l'objet d'efforts intenses depuis plusieurs décennies. L'expertise paraît s'être ouverte dans ce domaine : plus d'un million de personnes de par le monde connaissent et utilisent les méthodes avancées de la biologie moléculaire ; des kits et protocoles sont disponibles à tous pour appliquer ces méthodes ; enfin, même les méthodes biomoléculaires moins avancées se sont récemment démocratisées avec le mouvement dit de « biologie de garage », dont l'association *La Paillasse* est le principal représentant en France.

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

La marge d'amélioration dans le domaine biomoléculaire relève donc plus de l'automatisation des phases de clonage et de caractérisation que d'autre aspects. Par exemple, *Amyris*, la société de biologie de synthèse qui a développé le processus de bioproduction d'artémisinine, a automatisé ses méthodes de clonage à l'échelle de volumes usuels, puis à des microvolumes. Cette automatisation a considérablement augmenté les chances de succès de ses expériences.

En revanche, la phase de conception, qui relève de modélisations mathématiques et de simulations informatiques, est soumise à plusieurs verrous scientifiques et méthodologiques – une situation qui reflète sans doute un investissement bien moindre. Voici quelques-uns de ces verrous.

D'une part, chaque logiciel dans ce domaine a été conçu par une équipe différente, qui a suivi la logique propre à sa discipline d'origine. Par exemple, pour concevoir une voie métabolique, on fera coexister des modèles métaboliques et d'autres sur la structure et le repliement des protéines si une enzyme de la voie métabolique doit être modifiée. De plus, toute modification des biomolécules de la voie se fera par génie génétique. Ce dernier s'appuiera sur des robots de biologie moléculaire provenant de divers fabricants. Or les logiciels de l'ingénierie métabolique, de la biologie structurale des protéines, du génie génétique, et des robots de biologie moléculaire « parlent » des langages incompatibles, que ce soit au plan conceptuel ou dans leur implémentation informatique. Il serait donc utile de développer des programmes faisant le lien entre ces différents langages.

Par ailleurs, les outils informatiques disponibles sont encore trop spécialisés et complexes. Il manque des outils qui permettraient d'abaisser le niveau d'expertise nécessaire à un projet. Du point de vue industriel, la biologie de synthèse est encore en enfance. L'expertise est répartie entre une centaine d'équipes à travers le monde. Encore bien plus rares sont les équipes qui maîtrisent l'ensemble de la chaîne requise pour un grand projet tel celui de l'artémisinine. La biologie de synthèse ne deviendra accessible à une large population d'ingénieurs biotechnologues que lorsque des outils génériques normalisés et aux interfaces simples auront été mis en place.

Un autre saut qualitatif sera effectué quand on utilisera mieux les capacités sensorielles et cognitives des experts. Actuellement, les outils de modélisation ne font appel qu'à la vue d'un écran et au toucher d'un clavier. Il s'agirait de développer les interfaces avec les autres sens : les objets virtuels pourraient être façonnés par le toucher avec retour de force ou par l'ouïe, ce qui permettrait de régler simultanément de multiples paramètres. L'intelligence collaborative devrait aussi être mieux exploitée : ensemble, plusieurs individus résolvent des énigmes plus complexes qu'un individu seul.

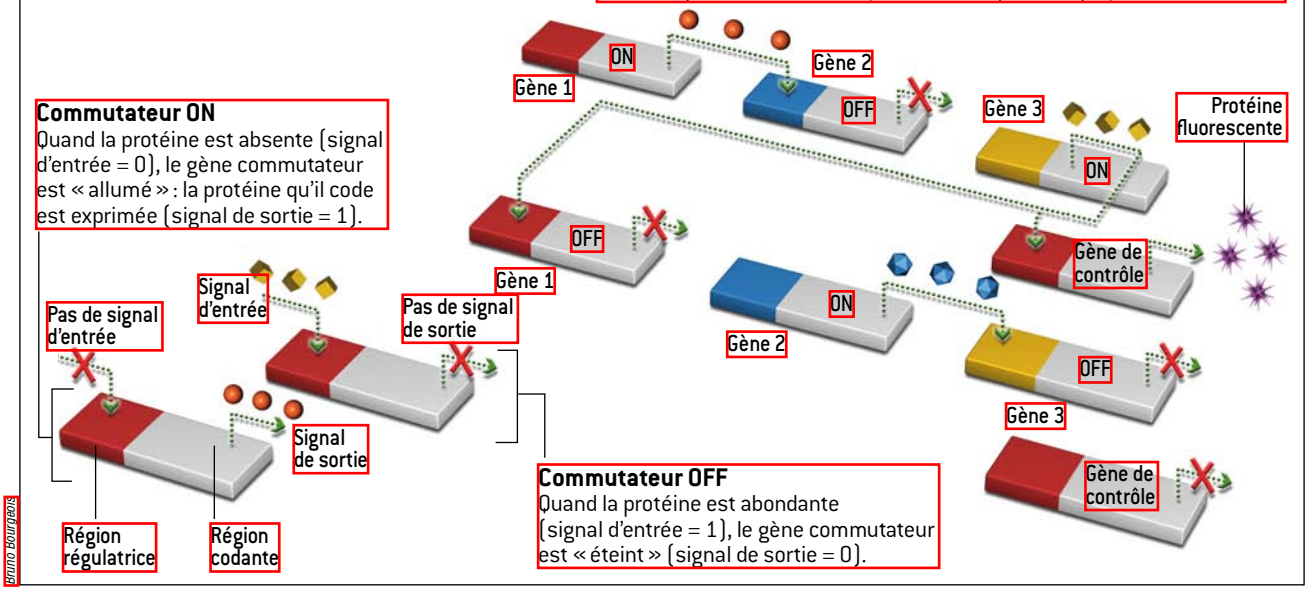
Une barrière, enfin, est la taille limite des circuits biochimiques que l'on réussit à construire. Aujourd'hui, la taille des circuits biochimiques viables introduits dans un organisme hôte plafonne autour

DE LA BIOBRIQUE AU CIRCUIT GÉNÉTIQUE

Des assemblages de gènes et de séquences régulatrices d'ADN peuvent être conçus pour fonctionner comme des composants électroniques : ils effectuent une opération booléenne, c'est-à-dire fournissent une réponse binaire (0 ou 1) à un signal d'entrée. Chaque assemblage ainsi construit est une biobrique qui peut être insérée dans un circuit génétique plus vaste.

UNE BIOBRIQUE
Un exemple simple de biobrique est le commutateur biochimique : un gène effectue l'opération booléenne SAUF en réponse à un signal d'entrée – une protéine codée par un autre gène.

UN CIRCUIT GÉNÉTIQUE
On construit un circuit génétique simple en connectant trois commutateurs, chacun constitué d'un gène différent (gènes 1, 2 et 3). Les gènes oscillent entre les états ON et OFF selon le signal propagé le long du circuit.
Le comportement peut être vérifié par un gène de contrôle qui intercepte la protéine produite par un des commutateurs (ici le gène 3) et produit alors une protéine détectable (fluorescente, par exemple).



bruno bourgeois

UN EXEMPLE DE CIRCUIT GÉNÉTIQUE

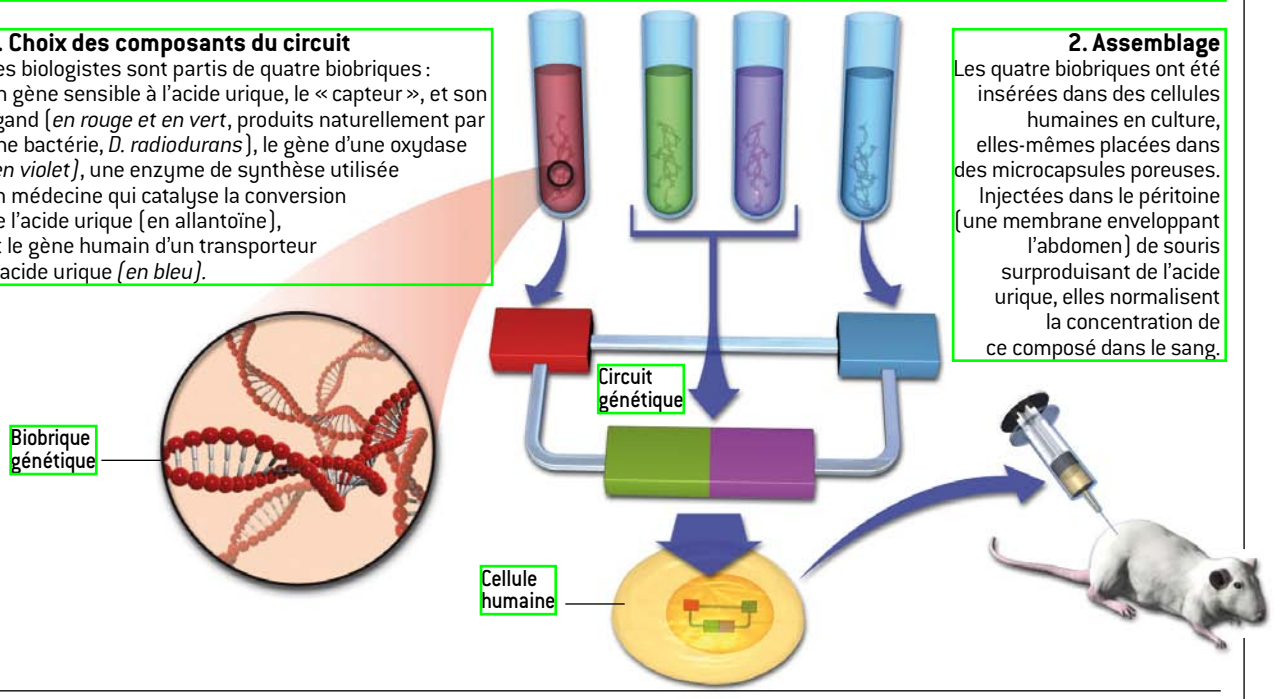
Une concentration élevée d'acide urique dans le sang peut entraîner une maladie, la goutte (des dépôts d'acide urique se forment dans les articulations, la peau, les reins…). Des biologistes de l'École polytechnique fédérale de Zurich, en Suisse, ont conçu un circuit génétique pour contrôler et réguler en permanence cette concentration. Celui-ci fonctionne chez la souris.

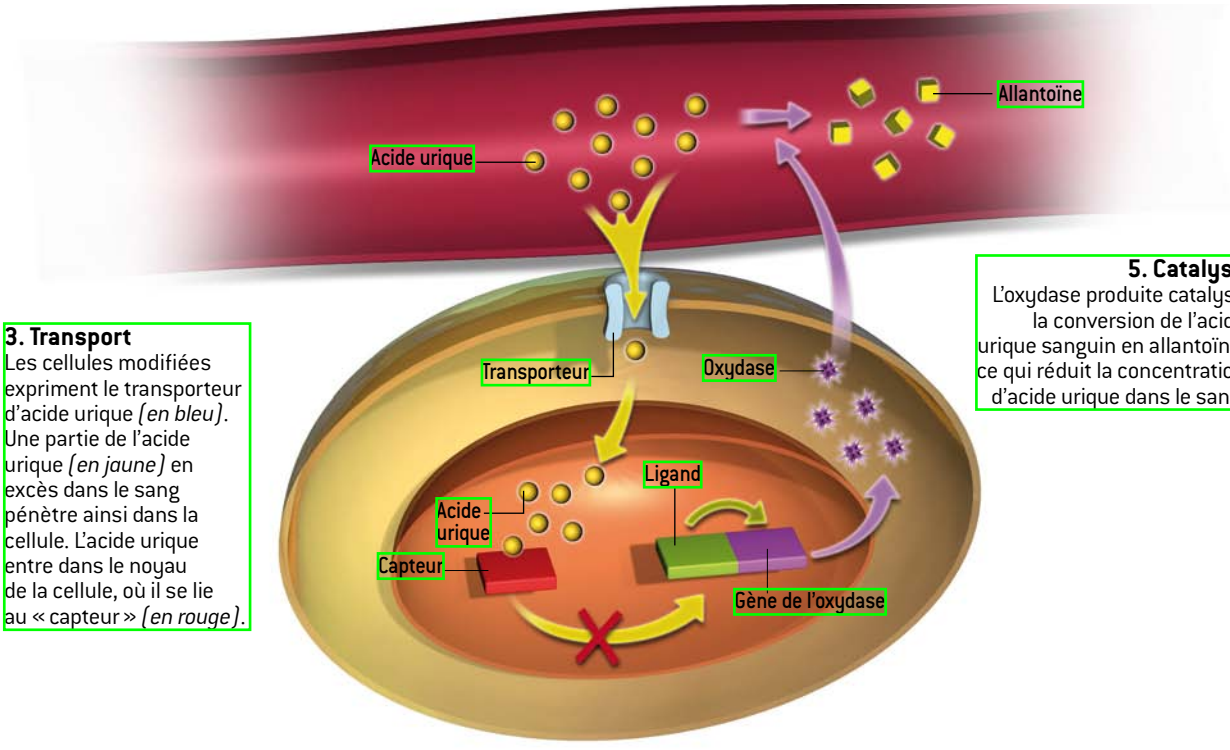
1. Choix des composants du circuit

Les biologistes sont partis de quatre biobriques : un gène sensible à l'acide urique, le « capteur », et son ligand *(en rouge et en vert*, produits naturellement par une bactérie, *D. radiodurans*), le gène d'une oxydase *(en violet)*, une enzyme de synthèse utilisée en médecine qui catalyse la conversion de l'acide urique (en allantoïne), et le gène humain d'un transporteur d'acide urique *(en bleu)*.

2. Assemblage

Les quatre biobriques ont été insérées dans des cellules humaines en culture, elles-mêmes placées dans des microcapsules poreuses. Injectées dans le péritoine (une membrane enveloppant l'abdomen) de souris surproduisant de l'acide urique, elles normalisent la concentration de ce composé dans le sang.





3. Transport

Les cellules modifiées expriment le transporteur d'acide urique *(en bleu)*. Une partie de l'acide urique *(en jaune)* en excès dans le sang pénètre ainsi dans la cellule. L'acide urique entre dans le noyau de la cellule, où il se lie au « capteur » *(en rouge)*.

5. Catalyse

L'oxydase produite catalyse la conversion de l'acide urique sanguin en allantoïne, ce qui réduit la concentration d'acide urique dans le sang.

4. Régulation

En se liant à son « capteur » *(en rouge)*, l'acide urique l'empêche de se fixer à son ligand *(en vert)*. Or le ligand, lorsqu'il n'est pas masqué par le capteur, agit comme un déclencheur (un promoteur) de l'expression de l'enzyme oxydase *(en violet)*. En d'autres termes, le capteur régule l'expression de l'enzyme oxydase : quand il se fixe à son ligand, l'expression de l'enzyme est bloquée, et inversement.

Bruno Bourgeois

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

En quête d'un génome minimal

Un des grands projets de la biologie de synthèse est la création d'un génome minimal – un génome qui ne contiendrait que les gènes nécessaires au fonctionnement de la cellule qui l'héberge, et ceux qui produiront les fonctions biologiques souhaitées.

L'intérêt d'utiliser un génome réduit est multiple. D'une part, cela diminuerait le coût énergétique de la réplication du génome lors de la division cellulaire. D'autre part, l'ADN codant les fonctions synthétiques pourrait être inséré à la place libérée.

Enfin, certaines séquences du génome, dites recombinogènes, sont connues pour favoriser les recombinaisons génétiques. En les retirant, on diminue le risque que le génome subisse des modifications spontanées. Plusieurs équipes sont impliquées dans la conception et la fabrication de tels génomes réduits. Ainsi, la société américaine *Scarab Genomics* commercialise des souches de colibacille dont l'ADN a été réduit de 15 pour cent, notamment par élimination des séquences recombinogènes. Cette société a été fondée en 2002 par Fred Blattner, dont l'équipe séquença le premier génome de colibacille.

À l'Université Johns Hopkins, aux États-Unis, Jef Boeke (aujourd'hui à l'Université de New York) et Joel Bader ont lancé le projet Sc2.0 d'un génome synthétique d'une cellule eucaryote, la levure de bière *Saccharomyces cerevisiae*. À ce jour, un chromosome a été synthétisé entièrement. Là aussi, les séquences recombinogènes ont été supprimées. En revanche, des séquences ont été introduites pour induire à volonté de nombreux réarrangements aléatoires de morceaux de chromosome. Il est donc possible de disposer d'un génome stable, mais, par un simple stimulus, d'induire son évolution accélérée. Ensuite les variants issus de cette évolution peuvent être sélectionnés sur un critère quelconque.

En 2010, l'Institut américain J. Craig Venter a publié la synthèse chimique du génome d'une bactérie, un mycoplasme (environ un million de paires de nucléotides). Introduit dans une souche cousine, ce génome était toujours fonctionnel : les cellules obtenues étaient capables de se diviser. Cette prouesse technique ouvre la voie à des génomes totalement synthétiques. En revanche, la séquence synthétisée était une copie quasi identique de la version naturelle. À l'évidence, le chemin sera encore long avant de pouvoir concevoir *de novo* un génome…

d'une dizaine de réactions. C'est le cas du circuit de bioproduction de l'artémisinine. Comment briser ce plafond pour construire des circuits biochimiques plus complexes et augmenter d'autant les possibilités de la biologie de synthèse ?

Pour une part, ce plafond tient à notre incapacité à concevoir un génome complet. Pour étendre fortement la taille et la complexité des circuits, il faudrait pouvoir introduire un nombre arbitraire de gènes qui coopéreraient de façon optimale selon un cahier des charges fixé par avance. Cela sous-entend de connaître l'ensemble des contraintes qui pèsent sur les génomes naturels des hôtes envisagés – une levure ou une bactérie, par exemple. La version modifiée de ce génome devrait non seulement tenir compte de ces contraintes, mais en tirer parti pour optimiser les circuits de synthèse.

Concevoir un génome *ab initio*

Plusieurs équipes se sont ainsi lancées dans des recherches visant à synthétiser ou à réduire des génomes complets d'organismes unicellulaires. C'est le cas, par exemple, de l'équipe de l'Institut J. Craig Venter, à Rockville aux États-Unis, et de celle de Fred Blattner, de l'Université du Wisconsin, à Madison, pour les bactéries, ou encore de celle de Jef Boeke et Joel Bader, de l'Université Johns Hopkins, à Baltimore, pour la levure *(voir l'encadré ci-dessus)*.

Ces travaux représentent des tours de force techniques. Paradoxalement, ils soulignent aussi les carences dans notre capacité à concevoir *ab initio* un génome. Par exemple, le génome de mycobactérie synthétisé par l'équipe de J. Craig Venter est quasi copié du génome naturel. C'est pourtant bien la conception à l'échelle du génome et non la copie qui permettra d'agrandir la taille et la complexité des circuits biochimiques, la synthèse d'ADN permettant ensuite de réaliser ce génome à façon.

Dans mon équipe, nous cherchons précisément à exploiter les contraintes connues des génomes de micro-organismes pour la conception *ab initio* de génomes porteurs de grands circuits de synthèse. En particulier, nous avons observé que les gènes qui fonctionnent ensemble (par exemple parce qu'ils sont régulés par les mêmes protéines) ne sont pas disposés au hasard le long des génomes. Au contraire, on les retrouve côte à côte ou à intervalles périodiques. Ces schémas semblent optimiser l'expression des gènes. Ce type d'observation conduit à proposer de respecter ces schémas « naturels » lors de l'insertion de gènes co-fonctionnels dans des chromosomes microbiens – une donnée qui devrait aider à augmenter la complexité des circuits.

On le voit, la biologie de synthèse n'est pas simplement un nouveau domaine de la biologie. Elle apporte un vaste socle méthodologique et conceptuel, ainsi qu'un état d'esprit nouveau en biotechnologie. Construire un système biologique qui fonctionne comme prévu est une façon de s'assurer que l'on a compris les phénomènes sous-jacents. En ce sens, la biologie de synthèse permet de faire progresser les connaissances sur le monde vivant. L'approche de l'ingénieur étant dominante, les applications industrielles ne sont cependant jamais loin.

Le potentiel économique de ces applications est considérable et concerne de nombreux domaines : santé (diagnostic, médicaments), agroalimentaire, environnement (biocapteurs de pollution), énergie (biocarburants), matériaux (biomatériaux « intelligents »), etc. En ouvrant toutes ces possibilités, la biologie de synthèse renouvelle les questions éthiques concernant la responsabilité des hommes à « artificialiser » le vivant. Jusqu'à quel point voulons-nous modifier ou recréer le vivant ? Quelle gouvernance de la biologie de synthèse adopter pour qu'elle corresponde bien à nos attentes ? Il est indispensable que ces questions soient dès maintenant continûment débattues. ■

Biologie de synthèse et sciences sociales, un dialogue difficile

Pierre-Benoit Joly et Benjamin Raimbault

Quel sera l'impact de la biologie de synthèse sur la société ? Comment éviter les dérives ? Les sciences sociales apporteraient un éclairage décisif si elles n'étaient pas cantonnées à un rôle inapproprié de médiateur.

Domaine de recherche en plein essor depuis le début des années 2000, la biologie de synthèse nourrit d'importantes ambitions théoriques puisqu'il s'agit d'appliquer les principes de l'ingénierie à la biologie. Conjointement, en s'annonçant comme la nouvelle révolution industrielle, elle revendique un grand potentiel d'applications et, par conséquent, de profonds changements économiques et sociaux, ses applications devant toucher des domaines aussi variés que la santé, l'agroalimentaire, l'environnement ou la production d'énergie. En pratique, si certains discours laissent entendre que la biologie de synthèse sera la corne d'abondance du début du XXIe siècle, très peu d'applications sont aujourd'hui disponibles, à l'exception de certains cas emblématiques tels que la semi-synthèse de l'artémisinine, un médicament antipaludéen produit désormais en grande quantité par *Sanofi*.

Néanmoins, la biologie de synthèse alimente déjà plusieurs débats au sein de la société. Par exemple, à la suite de la recommandation de l'Organisation mondiale de la santé d'utiliser des combinaisons thérapeutiques à base d'artémisinine, des milliers de petits producteurs asiatiques et africains ont développé la culture de la plante qui la produit naturellement, l'armoise annuelle. Après une période alternant surproduction et sous-production d'artémisinine naturelle, une initiative de planification à l'échelle mondiale de médicaments à base d'artémisinine a vu le jour en 2009, permettant de consolider la filière et de répondre aux besoins. Produite au même prix à partir de 2013, l'artémisinine de synthèse vient ainsi concurrencer les petits producteurs et perturber un marché encore fragile sans pour autant constituer un réel progrès médical. Dès lors, comment s'assurer que les applications de la biologie de synthèse seront bien en adéquation avec les besoins sociétaux et environnementaux, et limiter leurs effets négatifs ?

Une des principales originalités de la biologie de synthèse a été de vouloir anticiper les conséquences sociales de ses futures applications en développant de façon systématique une collaboration avec les sciences sociales. Depuis les débuts de la biologie de synthèse, plusieurs approches ont été menées dans ce sens, mais celles-ci ont leurs limites. Quelles sont-elles et comment les dépasser ? C'est ce que nous allons examiner.

L'ESSENTIEL

- **Pour anticiper les conséquences sociales des futures applications de la biologie de synthèse, les biologistes ont développé des collaborations avec les chercheurs en sciences sociales.**
- **Plusieurs approches ont été utilisées, mais des difficultés sont apparues.**
- **Les sciences sociales ont un rôle à jouer, mais celui-ci n'est ni de vaincre la contestation ni d'être le porte-parole de la société.**
- **Il est nécessaire de clarifier l'agenda de recherche et les questions de fond sur la biologie de synthèse et sa gouvernance.**

© Seamartin graphics/shutterstock

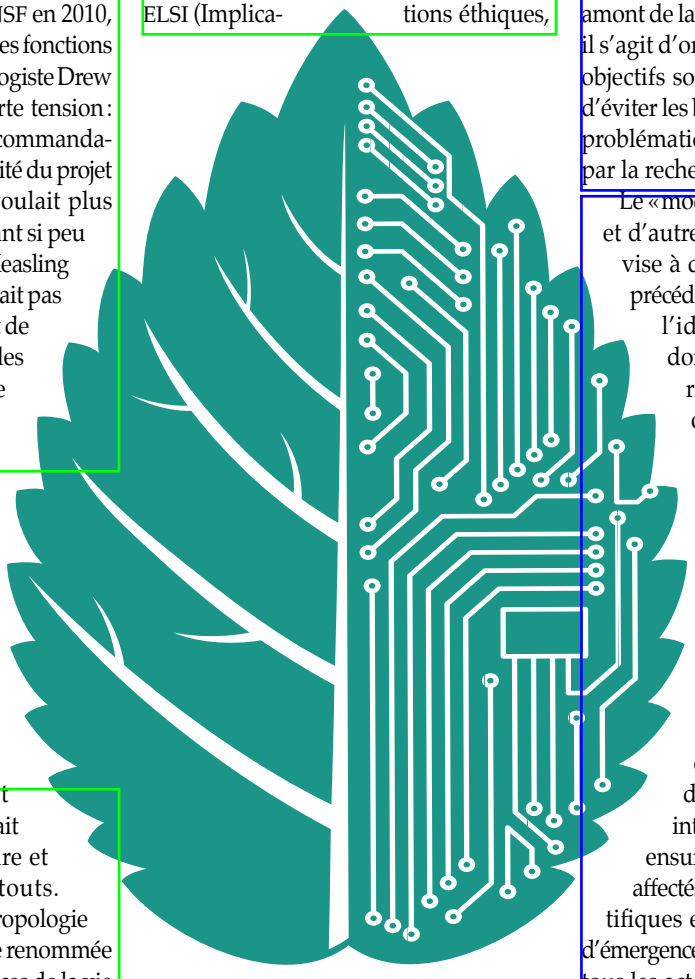
© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

En octobre 2011, le *New York Times* publiait un article sur le conflit qui opposait l'anthropologue américain Paul Rabinow à Jay Keasling, directeur du centre de recherche phare en biologie de synthèse, le SynBERC. Financé par la Fondation américaine de science (NSF), le SynBERC fédère les institutions académiques américaines les plus impliquées en biologie de synthèse, et P. Rabinow y était en charge de l'éthique et de la biosécurité. Son travail ayant été jugé trop descriptif et assez inutile lors de l'évaluation du projet par la NSF en 2010, P. Rabinow avait été démis de ses fonctions et remplacé par l'ingénieur biologiste Drew Endy. S'en était suivie une forte tension : P. Rabinow arguait que ses recommandations visant à améliorer la sécurité du projet étaient ignorées et qu'il ne voulait plus cautionner des chercheurs ayant si peu de sens des responsabilités ; J. Keasling répliquait que P. Rabinow n'avait pas fait le travail que l'on attendait de lui, qu'il ne le ferait pas et que les 700 000 dollars dédiés à l'axe de recherche *« Human practice »* étaient mal utilisés.

Ce conflit emblématique constitue un point de départ intéressant pour analyser les collaborations entre biologie de synthèse et sciences sociales et inscrire cette analyse dans le cadre plus large des interactions interdisciplinaires autour des sciences et techniques émergentes.

Lors de son lancement en 2006, cette collaboration était considérée comme exemplaire et bénéficiait des meilleurs atouts. P. Rabinow, professeur d'anthropologie à Berkeley, est un chercheur de renommée mondiale, spécialiste des sciences de la vie et des biotechnologies. Il avait rejoint le SynBERC pour participer à un programme scientifique original divisé en quatre axes de recherche dont l'un d'eux, l'axe *« Human practice »*, était dédié aux sciences sociales. Si son financement était relativement faible (trois pour cent du budget), le projet promettait de renouveler les interactions de la biologie de synthèse et des sciences sociales et, de façon plus allusive, les interactions science-société. P. Rabinow voyait dans sa contribution une collaboration susceptible d'influencer le contenu des recherches de ses collègues biologistes.

Pour P. Rabinow, cette initiative était la troisième et dernière génération des relations interdisciplinaires autour des sciences et techniques émergentes. Une première forme de contribution des sciences sociales, le « mode 1 », date du programme de séquençage du génome humain à la fin des années 1980. Conscientes des implications éthiques, sociales, politiques et économiques de ces recherches, les autorités publiques demandèrent que ce grand programme comporte un volet de recherche nommé ELSI (Implications éthiques, légales et sociales) permettant de mieux comprendre ces implications. Depuis lors, la plupart des grands programmes technoscientifiques comportent un tel volet, représentant en général trois à cinq pour cent des budgets. Il s'agit donc de produire une expertise visant à mieux anticiper les conséquences des applications des recherches de façon à éviter les effets négatifs.



Le « mode 2 » est venu en réponse à la contestation des sciences et des techniques dans les années 2000, concernant notamment les organismes génétiquement modifiés (OGM). Les grandes controverses publiques sont alors vues comme résultant d'un défaut de confiance dans les institutions scientifiques, défaut qu'une plus grande ouverture aux parties prenantes et aux acteurs de la société civile serait susceptible de corriger. Les sciences sociales sont alors considérées pour leur capacité à construire des espaces de dialogue, pour leurs compétences à définir les conditions et les procédures d'une démocratie technique. En consultant « la société » en amont de la production de connaissances, il s'agit d'orienter les recherches vers des objectifs socialement désirables et donc d'éviter les blocages liés à une acceptation problématique des inventions imposées par la recherche *(voir l'encadré page 38)*.

Le « mode 3 », proposé par P. Rabinow et d'autres au milieu des années 2000, vise à dépasser les limites des deux précédents. S'il partage avec le mode 2 l'idée que les sciences sociales doivent contribuer à l'amont des recherches par une meilleure orientation des explorations (et non à l'aval, par la régulation des inventions et la fabrique de l'acceptation de la nouveauté), P. Rabinow en souligne une double limite.

Sur un plan cognitif, d'abord, les parties prenantes ou concernées n'ont, par définition, aucune expérience d'une technologie émergente et manquent donc de ressources cognitives pour intervenir. Sur un plan politique, ensuite, l'identification des acteurs affectés par les développements scientifiques est impossible dans la phase d'émergence ; il est donc nécessaire d'inclure tous les acteurs qui le souhaitent dans le débat, ce qui pose la question de la représentativité des participants. Ainsi, alors que ces espaces de débats sont censés favoriser un dialogue entre science et société, ils sont le plus souvent vivement critiqués et leur légitimité est remise en cause.

Face à ces limites, le mode 3 vise à développer un espace de problématisation et d'enquête permettant de travailler sur l'éthique du futur proche de la biologie de synthèse. Cela requiert un travail collaboratif rassemblant chercheurs en sciences sociales et biologistes autour des concepts et pratiques encore balbutiants

de la nouvelle discipline. Si, depuis la fin des années 1970, des chercheurs en sciences sociales sont accueillis au sein de laboratoires de sciences « dures », l'originalité du programme de P. Rabinow est de considérer ces chercheurs non plus en tant que simples observateurs, mais en tant que collaborateurs. Ils deviennent des « chercheurs embarqués » qui participent à l'orientation des recherches en amont. Il peut s'agir d'expliciter les jugements de valeurs implicites qui orientent des choix de recherche ou de favoriser une plus grande ouverture dans ces choix de recherche. Il s'agit aussi de travailler avec les biologistes sur les questions non seulement éthiques, mais aussi ontologiques, métaphysiques, sociales et politiques posées par leurs recherches *(voir l'encadré page 39)*.

Ces trois modes ne sont pas exclusifs et certains Centres de recherche, tel le Nanocentre de l'Université d'État de l'Arizona, ont développé un programme de « gouvernance anticipatrice » qui associe des éléments relevant de chacun de ces modes.

La biologie de synthèse est souvent présentée comme un domaine propice aux interactions transdisciplinaires. La communauté qui la développe est ouverte aux interactions avec d'autres acteurs et prête à lancer des débats sur ses travaux. Il s'agit d'une communauté émergente, créative et réflexive, qui a une conscience assez forte des opportunités et des dangers liés à ses interactions avec la société. La saga des OGM a laissé chez les biologistes un goût amer et forgé la conviction qu'il faut œuvrer pour éviter que se reproduise un tel rejet d'un nouveau champ technologique. Cette préoccupation est d'autant plus forte pour la biologie de synthèse que la frontière avec le génie génétique, l'ingéniérie métabolique ou… les OGM est poreuse ! Néanmoins, au-delà de cette préoccupation, tout est à faire, puisqu'il n'existe pas d'expérience de telles collaborations. De plus, le rôle des sciences sociales pouvant être fort différent (et discuté au sein même des sciences sociales), cette diversité peut être source de quiproquos ou d'incompréhension.

Des rapports de force asymétriques

Prenons un autre exemple, celui du Royaume-Uni où les chercheurs en sciences sociales ont été très tôt associés à la construction des réseaux en biologie de synthèse, à la rédaction de la feuille de route et intégrés comme chercheurs embarqués dans des projets de biologie de synthèse. Forts de cette expérience, ils soulignent que les sciences sociales sont en général attendues sur le front des risques et de l'éthique, et qu'on escompte qu'elles amélioreront l'acceptabilité de la biologie de synthèse. Tout comme P. Rabinow, ils plaident pour un travail collaboratif avec les biologistes afin d'améliorer la compréhension commune de l'émergence de cette nouvelle technologie et de la façon dont elle conditionne les applications. L'enjeu est de promouvoir une recherche et une innovation responsables en intervenant en amont de la production scientifique et technique, et d'améliorer la pertinence sociale des projets de recherche en identifiant les moments et les lieux où les choix sont faits.

Difficile d'être en désaccord avec cet objectif. Mais le moyen préconisé, la recherche collaborative, est-il adéquat pour parvenir à une telle fin ? Probablement pas si l'on se réfère à l'expérience de P. Rabinow et d'autres chercheurs. L'apparente symétrie du programme n'a pas résisté à une profonde asymétrie dans les rapports de force entre chercheurs en sciences sociales et biologistes. Notamment, soumis à une

LES AUTEURS

Pierre-Benoit JOLY est directeur de recherche à l'INRA (unité Sciences en société, SenS), à Champs sur Marne. Il dirige l'Institut francilien recherche, innovation, société (IFRIS) et le Labex SITES, Université Paris Est.

Benjamin RAIMBAULT est ingénieur agronome et doctorant en sociologie dans l'unité SenS.

BIBLIOGRAPHIE

P. Rabinow et G. Bennett, **Designing Human Practices – An Experiment with Synthetic Biology,** Chicago University Press, 2012.

P.-B. Joly *et al.*, **Biologie de synthèse : conditions d'un dialogue avec la société,** Étude pour le MESR, 2011.

À ÉCOUTER

Le jeudi 29 mai 2014, de 14h à 15h, Pierre-Benoit Joly reviendra sur le dialogue des sciences sociales et de la biologie de synthèse dans la partie Actualités de l'émission **La marche des sciences,** sur *France Culture*. **www.franceculture.com**

Un dialogue public au Royaume-Uni

En 2007, pour éviter de répéter la controverse sur les OGM, le gouvernement britannique fonde le *Sciencewise Expert Ressource Centre*, dont la mission est de promouvoir des initiatives de dialogue public sur les sciences et techniques émergentes.

En 2009, un dialogue est ainsi lancé sur la biologie de synthèse. Celui-ci est représentatif des limites de cette approche indifférenciée du public. Conduit par un cabinet de marketing, il comporte une phase d'entretiens avec 41 parties prenantes, suivie d'une phase d'ateliers avec des « membres du public ». Seize groupes de dix personnes représentatives de la diversité socio-économique de la population sont recrutés dans quatre villes. Chaque groupe se réunit à trois reprises. Un atelier est dédié à l'impact des sciences et des techniques, un second à la perception de la biologie de synthèse et à la gouvernance et un troisième aux impacts potentiels de la biologie de synthèse et aux conditions de son développement.

Les résultats sont consignés dans un rapport de 90 pages publié en 200 exemplaires qui sont distribués aux chercheurs et autres parties prenantes, aux médias et aux parlementaires. Peu diffusé et lu, il n'a que peu d'influence dans les choix de gouvernance.

Les résultats sont décevants : ils expriment un soutien à la biologie de synthèse, à condition que les débordements éventuels soient évités par une réglementation adéquate – des conclusions qui ressemblent beaucoup à celles formulées par les défenseurs de la biologie de synthèse. Le dialogue ne contribue ni à la définition des objets, ni à celle des programmes et des enjeux, pourtant centrales pour une gouvernance efficace de la biologie de synthèse…

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

compétition internationale intense, les biologistes n'ont en pratique que peu de temps à consacrer à une réflexion sur leur discipline. On peut aussi s'interroger sur la légitimité des sciences sociales à orienter les choix de recherche en biologie de synthèse.

Comment sortir de l'ornière ? Tout d'abord, il convient de rétablir une plus grande symétrie entre sciences sociales et biologie, de conférer aux premières l'autonomie dans la définition de leur objet de recherche afin d'établir la collaboration sur des bases équilibrées. Les échecs et difficultés témoignent d'une profonde incompréhension de ce que peut être un travail de recherche en sciences sociales. L'éviction de P. Rabinow montre que le chercheur en sciences sociales est considéré avant tout comme l'expert de « la société », capable d'ajuster les recherches afin qu'elles soient acceptables. Or le rôle des sciences sociales n'est pas de prescrire des antidotes contre d'éventuelles contestations ni d'être le porte-parole d'une société plurielle. Anthropologie, sociologie, philosophie, géographie, psychologie… les sciences sociales sont multiples et à chacune d'elles correspondent des théories, hypothèses de recherche et modes d'enquête propres. On peut dès lors imaginer plusieurs objets de recherche passionnants.

Prendre de la distance

Par exemple, dans notre laboratoire, nous travaillons sur le phénomène de l'émergence des champs technoscientifiques. Comment caractériser de tels processus ? Quelles sont les différences entre les émergences des champs scientifiques contemporains et de ceux apparus il y a plusieurs décennies ? Concernant la biologie de synthèse, nous observons deux points essentiels.

D'une part, les biologistes au cœur du processus ont un rôle à la fois de définition des questions de recherche et de structuration sociale de l'environnement de la biologie de synthèse. Par exemple, ils travaillent sur la propriété intellectuelle (en réfléchissant sur le libre accès des recherches – l'*open source biology*), sur la gestion des risques (avec le concept de sécurité à la conception – *safety by design*) ou sur l'enseignement de la discipline. D'autre part, si elle a des ambitions fondamentales, la biologie de synthèse se constitue autour de promesses d'applications pour résoudre de grands problèmes (énergétiques, médicaux, environnementaux…). La construction de la crédibilité et de la légitimité des promesses conditionne la mobilisation des ressources et donc l'émergence de la biologie de synthèse.

Du fait de ces deux caractéristiques, il est impossible de distinguer les dimensions scientifiques et techniques de celles socio-économiques et politiques ; l'émergence de la biologie de synthèse est hybride, touchant à la fois la connaissance et la société. Cette caractéristique n'est pas inédite. Aussi, plutôt que de mettre l'accent sur une nouveauté radicale, il est primordial d'étudier l'émergence d'un point de vue historique pour identifier des récurrences, concernant par exemple les formes de réglementation de la nouveauté ou la propriété intellectuelle.

Ces observations peuvent aussi inspirer d'autres axes de recherche, notamment sur les conditions et modalités de la gouvernance de la biologie de synthèse. Dire que la biologie de synthèse est hybride, c'est admettre qu'elle ne peut pas être gouvernée par les seuls scientifiques (sciences sociales incluses). Il s'agit donc d'identifier les acteurs, les forces, les rapports de pouvoir. Qui finance la biologie de synthèse ? Comment sont faits les choix d'orientation ? Quelles visions du monde, quels imaginaires les inspirent ?

En même temps, il est nécessaire de ne plus voir la biologie de synthèse comme une évidence. Sa définition elle-même n'est pas stabilisée et unifiée. Se posent alors de nombreuses questions. Pourquoi parle-t-on de biologie de synthèse ? Quelle est l'origine de la notion ? Quels en sont les principes de démarcation ? On ne pourra saisir la spécificité des problèmes de gouvernance suscités par la biologie de synthèse qu'en y répondant.

D'autres objets de recherche sont possibles : comment, par exemple, la biologie de synthèse bouscule-t-elle la notion de frontière entre vivant et inanimé, naturel et artificiel ? L'idée essentielle est que la constitution de tels objets de recherche est une condition nécessaire pour susciter l'intérêt des biologistes à l'égard des sciences sociales. C'est sur cette base que se noueront des collaborations fructueuses et cela passe par une prise de distance par rapport à la démarche de chercheurs embarqués.

Cette prise de recul n'apporte pas la garantie d'un développement sans contestation des technologies émergentes. Mais elle permettra de produire des connaissances essentielles sur les enjeux qui se tissent autour de la biologie de synthèse et sur les relations entre sciences et société. ■

CHERCHEURS EMBARQUÉS

Le striga est une herbe qui parasite les cultures de riz, de sorgho, de cornille ou de maïs *(ci-dessus)*, notamment en Afrique. Au Collège impérial de Londres, Travis Bayer et ses collègues se sont intéressés à la lutte contre cette herbe. Avec l'aide de deux chercheurs en sciences sociales « embarqués », ils se sont rendus au Zimbabwe pour échanger avec des agriculteurs et comprendre leurs besoins : ces petits producteurs n'ont pas les moyens d'acheter des traitements. Les biologistes ont alors conçu une levure qui produit une molécule provoquant une germination anticipée du striga, avant les semences, ce qui entraîne sa mort. Reste à viabiliser le projet et intéresser des investisseurs…

La supersymétrie, une théorie en crise ?

Joseph Lykken et Maria Spiropulu

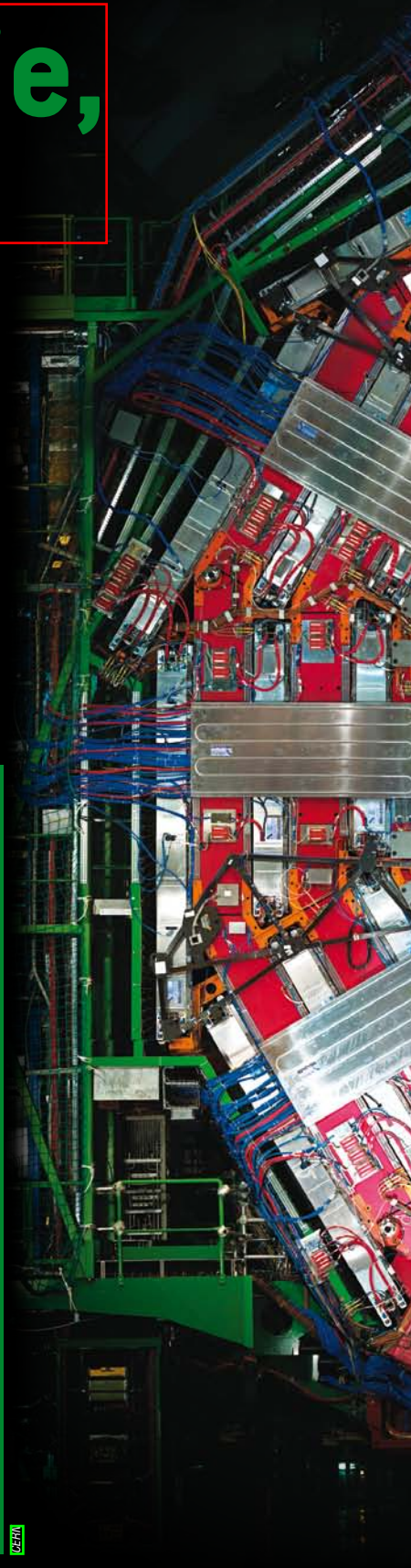
Les théories supersymétriques promettent une meilleure compréhension du monde des particules élémentaires. Mais aucun indice de supersymétrie n'est apparu dans les expériences récentes réalisées au CERN. Cette idée séduisante risque-t-elle d'être abandonnée ?

Ce matin de l'été 2012, à l'aube, nous en étions déjà à notre troisième expresso quand la liaison vidéo a été établie. Nous pouvions entamer une de nos réunions régulières de l'équipe *Razor*, nous à l'Institut de technologie de Californie et nos collègues au CERN, à Genève. Le groupe est constitué de physiciens chargés d'analyser certaines données du LHC (*Large Hadron Collider*, ou Grand collisionneur de hadrons). L'équipe s'intéresse plus particulièrement aux résultats de collisions de protons de haute énergie au cœur de l'expérience CMS (Solenoïde compact à muons, *voir la figure 1*), à la recherche d'événements dits exotiques qui apporteraient les premières preuves de la supersymétrie. Cette théorie de la matière développée il y a près de 45 ans est censée résoudre certains problèmes fondamentaux du modèle standard de la physique des particules et expliquer la nature de la mystérieuse matière noire de l'Univers. Or malgré des décennies de recherche, aucune preuve expérimentale de la supersymétrie n'est apparue à ce jour.

Au CERN, Maurizio Pierini, le chef de l'équipe *Razor*, montrait un graphique de nouvelles données ; à neuf fuseaux horaires de distance, nous pouvions voir les sourcils froncés de tous les membres présents dans la salle : il y avait une anomalie. « Quelqu'un devrait examiner cet événement », déclara M. Pierini. En quelques minutes, nous avions tous deux récupéré sur un ordinateur portable tout l'enregistrement de cette collision.

L'ESSENTIEL

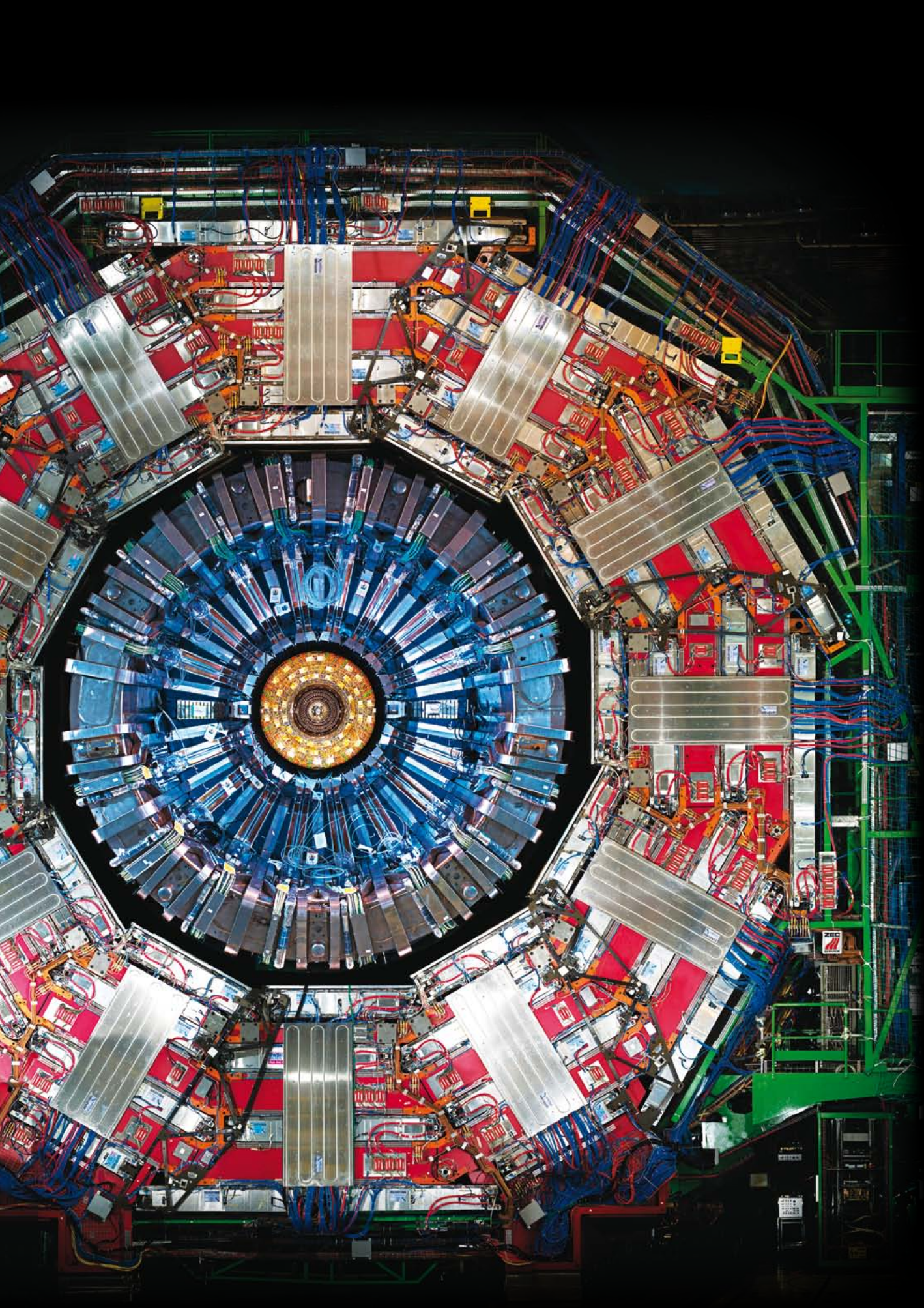
- Les théories de la supersymétrie postulent qu'à chaque espèce de particule correspond un « superpartenaire » de masse élevée.
- La supersymétrie résout certains problèmes inhérents au modèle standard de la physique des particules.
- La nature de la matière noire reste inconnue, mais la supersymétrie suggère des candidats.
- Les expériences au LHC, le grand collisionneur de protons du CERN, n'ont pas révélé jusqu'ici d'indices de supersymétrie. Les théoriciens envisagent des alternatives.



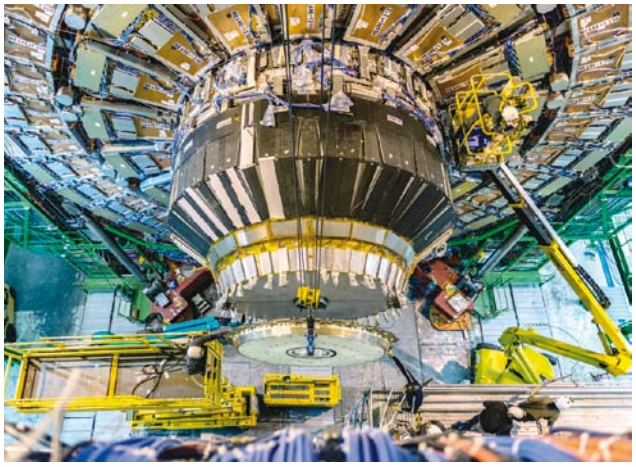
CERN

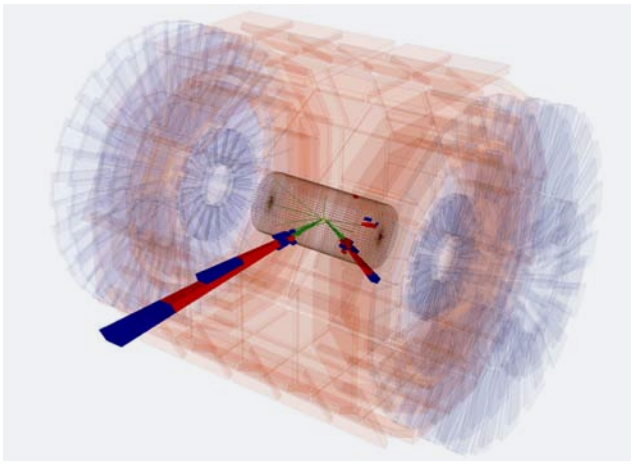
1. LE DÉTECTEUR CMS, au grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN, entamera une nouvelle campagne de recherche de preuves de l'existence de la supersymétrie à partir de 2015.

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014



© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014





CERN/CMS

2. L'AUGMENTATION DE L'ÉNERGIE DES COLLISIONS permettra à l'expérience CMS *(à gauche)* de rechercher des particules supersymétriques plus massives. Un signal positif de supersymétrie pourrait ressembler à cette fausse alerte enregistrée en 2012 *(à droite)* : deux jets de particules *(rouge et bleu)* partent vers le bas, ce qui suggère que des superpartenaires, invisibles pour le détecteur, s'échappent vers le haut.

La supersymétrie est une solution efficace et mathématiquement élégante pour expliquer des tracas qui tourmentent les physiciens depuis longtemps. Cette théorie apporte des réponses à toute une série de questions importantes. Pourquoi les particules ont-elles ces masses-là ? Pourquoi les forces ont-elles ces intensités-là ? En d'autres termes : pourquoi l'Univers est-il tel qu'il est ? De plus, la supersymétrie prévoit l'existence de particules nouvelles, des « superpartenaires » de celles qu'on connaît, et jusqu'ici non observées. Ces particules pourraient constituer la matière noire, qui représente 85 pour cent de la matière de l'Univers et qui se manifeste uniquement par des effets gravitationnels.

Pour de nombreux physiciens des particules, la théorie de la supersymétrie est nécessairement vraie, tant elle est convaincante. Ils espèrent que le LHC découvrira ces superpartenaires, ce qui prouverait sa validité.

Quand nous avons téléchargé les données de la collision mentionnée plus haut, nous avons immédiatement pensé y voir un signal de la supersymétrie. Deux jets de particules partaient du centre du détecteur, vers le bas. Des particules invisibles pour les détecteurs étaient-elles parties vers le haut, peut-être des superpartenaires ? Mais l'analyse détaillée des différents signaux nous a rapidement fait supposer un mauvais fonctionnement du détecteur *(voir la figure 2)*. Et en effet, c'était bien là l'explication.

Les résultats de la première campagne de fonctionnement du LHC ont exclu presque toutes les versions les mieux étudiées de la supersymétrie, celles où les superpartenaires sont plutôt légers. Pour l'instant, ces résultats négatifs n'ont pas provoqué une crise à grande échelle de la physique des particules, mais plutôt une inquiétude généralisée. Le LHC entamera sa prochaine campagne au début de 2015, avec des collisions à des énergies plus élevées (14 téraélectronvolts), ce qui permettra aux chercheurs des expériences ATLAS et CMS de débusquer (s'ils existent) des superpartenaires plus lourds que dans les modèles précédents. Si, à la fin de cette campagne, la supersymétrie se dérobe toujours, la physique fondamentale se trouvera à la croisée des chemins : abandonner les travaux de toute une génération faute de preuves, ou persévérer dans la même voie en espérant qu'un collisionneur plus puissant révélera un jour des particules liées à la supersymétrie.

La supersymétrie, hypothèse nécessaire

L'histoire des sciences a connu de longues quêtes couronnées de succès – ne serait-ce que la découverte récente, au LHC, du boson de Higgs, particule qui s'est fait attendre près de 40 ans. Mais pour le moment, la plupart des théoriciens des particules s'impatientent, tandis qu'au LHC on se prépare à tester les fondations de l'édifice théorique qu'ils ont mis un demi-siècle à bâtir.

Nous disposons en physique subatomique d'une théorie prédictive très efficace, le modèle standard, qui décrit les particules et leurs interactions. Dans ce modèle, qui est une théorie quantique des champs (fondée sur la physique quantique et la théorie de la relativité restreinte d'Einstein), la matière est constituée d'un type de particules, les fermions (du nom du physicien italien Enrico Fermi). Ces particules de matière interagissent *via* l'échange d'une autre variété de particules, les bosons (du nom du physicien indien Satyendranath Bose).

Le modèle standard décrit fort bien ce qui se passe au niveau subatomique. Il a été testé depuis les années 1970 sans présenter de faille. Mais les ennuis commencent quand on s'interroge sur l'origine des caractéristiques du modèle standard. Par exemple, ce modèle stipule qu'il existe trois types différents de leptons (des fermions) : l'électron, le muon et le tau. Pourquoi trois ? Pourquoi pas deux, ou quatre, ou quinze ? Le modèle standard ne l'explique pas. De même, on peut se demander pourquoi l'électron a une masse d'une telle valeur et pas une autre. Par exemple, pourquoi est-il plus léger que le boson de Higgs ? Sur ce sujet encore, le modèle standard ne dit rien.

Les physiciens théoriciens réfléchissent beaucoup à ces questions. Ils construisent des modèles plus fondamentaux dont le modèle standard serait la manifestation à basse énergie. Ces théories sont censées expliquer comment le modèle standard fonctionne et ce qui détermine les valeurs de ses paramètres. La théorie des cordes, par exemple, est l'une des voies explorées parmi bien d'autres.

Cependant, tous ces modèles plus fondamentaux impliquent l'existence de nouvelles particules hypothétiques. Celles-ci pourraient avoir une masse extrêmement élevée, d'où la difficulté à les créer dans les expériences. Cela expliquerait pourquoi on

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

ne les a pas encore repérées au LHC. Mais ces particules qui semblent incontournables soulèvent des difficultés par leur influence sur les particules ordinaires. Comment ? La réponse se trouve du côté de l'étrangeté quantique.

En théorie quantique des champs, les particules interagissent *via* l'échange de particules dites virtuelles qui n'ont qu'une existence très brève. Par exemple, la répulsion électrique entre deux électrons est décrite, en première approximation, par l'échange d'un photon virtuel entre les deux électrons. Dans les années 1940-1950, le physicien américain Richard Feynman a conçu des règles élégantes pour transcrire les calculs correspondant à ces processus sous la forme de diagrammes visuellement parlants.

Mais en physique quantique, tout ce qui n'est pas strictement interdit se produit effectivement, au moins de temps à autre. Ainsi, les électrons peuvent interagir entre eux, mais aussi avec toutes les particules très massives dont l'existence est prédite par les extensions du modèle standard. Or ces interactions conduisent à des difficultés – à moins qu'une propriété telle que la supersymétrie ne vienne les résoudre.

Voyons comment un tel problème se manifeste dans le cas du boson de Higgs. Cette particule confère aux autres particules élémentaires leur masse par son interaction avec elles. S'il existe des particules superlourdes, alors le boson de Higgs interagirait aussi avec elles par l'intermédiaire de particules virtuelles. Or le boson de Higgs acquiert une partie de sa propre masse par des interactions virtuelles. En présence de particules superlourdes, il deviendrait lui-même superlourd. Par conséquent, toutes les particules que nous connaissons devraient être superlourdes et les conséquences seraient catastrophiques pour l'Univers. Nous deviendrions tous des trous noirs. Or ce n'est pas ce que nous observons. Il existe donc un mécanisme qui empêche cette catastrophe. Et rien n'explique aussi bien que la supersymétrie pourquoi cela n'arrive pas.

Les principes fondamentaux de la supersymétrie ont été développés dans les années 1970 par des physiciens qui s'intéressaient aux relations entre les symétries et la physique des particules. La supersymétrie n'est pas à proprement parler une théorie, mais plutôt un cadre théorique. De nombreux modèles sont qualifiés de supersymétriques, car ils sont fondés sur le même type de symétries.

Plusieurs symétries classiques sont intégrées dans les lois physiques portant sur les particules et leurs interactions. En effet, ces lois ne doivent pas dépendre de l'endroit où vous êtes, de la direction considérée, de votre état de mouvement. La physique est la même dans toutes ces situations et les symétries le garantissent. À ces symétries spatio-temporelles (symétries par translation dans le temps et dans l'espace, symétrie par rotation) correspondent des lois de conservation de l'énergie, de la quantité de mouvement et du moment cinétique.

Les symétries font la loi

La physique quantique semble respecter toutes ces symétries. Les scientifiques ont même utilisé les symétries pour prévoir de nouveaux phénomènes. Par exemple, le physicien britannique Paul Dirac a montré en 1930 que quand on combine la mécanique quantique avec la relativité restreinte, les symétries de l'espace-temps impliquent qu'à chaque type de particule correspond une antiparticule (de même masse mais de charge opposée). Cette idée semblait folle à l'époque parce que personne n'avait jamais observé d'antiparticule. Mais les expériences ont prouvé que Dirac avait raison : le zoo des particules élémentaires est dédoublé.

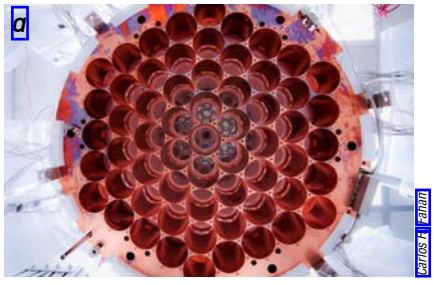
La théorie de la supersymétrie repose sur un argument similaire à celui de Dirac. Elle postule qu'il existe une extension quantique de l'espace-temps nommée le superespace, par rapport auquel les particules ont une symétrie.

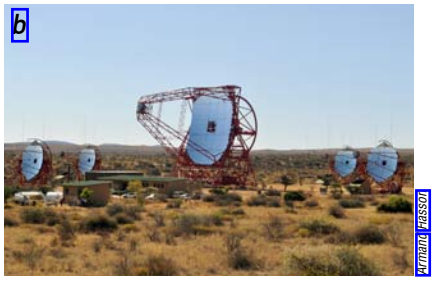
Le superespace ne présente pas de dimensions spatiales ordinaires telles que gauche-droite ou haut-bas, mais plutôt des dimensions « fermioniques ». Le mouvement dans une dimension fermionique est très limité. Dans une dimension spatiale ordinaire, vous pouvez vous déplacer aussi loin que vous voulez dans toutes les directions, sans restriction de la taille ou du nombre de pas que vous faites. En revanche, dans une dimension fermionique, vos pas sont quantifiés, et une fois que vous avez fait un pas vous avez atteint l'extrémité de cette dimension fermionique. Si vous voulez faire d'autres pas, vous devez soit passer à une autre dimension fermionique, soit reculer d'un pas.

LES AUTEURS

Joseph LYKKEN est physicien théoricien au Laboratoire américain de l'accélérateur Fermi de Batavia, dans l'Illinois.

Maria SPIROPULU est physicienne des particules expérimentatrice à l'Institut de technologie de Californie. Après avoir travaillé au Tevatron du Laboratoire Fermi, elle participe désormais à l'expérience CMS, au LHC du CERN.





3. LA RECHERCHE DE MATIÈRE NOIRE sous forme de particules supersymétriques se fait par différentes approches, outre le LHC. Dans l'expérience LUX, dans le Dakota du Sud *(a)*, les physiciens cherchent des collisions très rares de ces particules avec la matière ordinaire. Les télescopes HESS-2, en Namibie *(b)*, étudient par exemple le rayonnement énergétique provenant du centre galactique. Il pourrait être produit par l'annihilation de paires de particules de matière noire.

Un boson qui fait un pas dans une dimension fermionique se transforme en fermion ; inversement, un fermion se transforme en un boson après un pas. De plus, si la particule effectue un pas dans une dimension fermionique et qu'elle revient ensuite en arrière, elle se sera déplacée d'une petite quantité dans l'espace ou le temps ordinaires. Autrement dit, dans les théories supersymétriques, le mouvement dans les dimensions fermioniques est lié de façon complexe au mouvement dans l'espace-temps ordinaire.

Pourquoi tout cela est-il important ? Parce que dans un monde supersymétrique, les symétries entre les dimensions fermioniques restreignent la façon dont les particules peuvent interagir. En particulier, les supersymétries dites naturelles éliminent dans une large mesure les effets des particules virtuelles. Les supersymétries naturelles empêchent le boson de Higgs d'interagir avec les particules les plus lourdes et d'augmenter ainsi inconsidérément sa masse. Les théories qui sont supersymétriques mais non « naturelles » obligent à trouver des mécanismes complémentaires pour réprimer les effets des particules virtuelles. Ainsi, la supersymétrie naturelle fournit aux physiciens des solutions aux difficultés du modèle standard.

Toutes les théories supersymétriques impliquent que chaque boson a une particule partenaire fermionique, un « superpartenaire », et inversement. Or aucune particule connue n'est le superpartenaire d'une autre. Si la supersymétrie existe, les superpartenaires de toutes les particules du modèle standard sont à découvrir.

Et c'est bien là le problème. Dans les versions les plus simples et les plus efficaces de la supersymétrie (la supersymétrie naturelle), les superpartenaires ne devraient pas être beaucoup plus lourds que le boson de Higgs. Cela signifie que nous devrions être capables de les détecter au LHC. Et si l'on avait posé la question aux physiciens il y a dix ans, la plupart auraient prédit que l'on aurait désormais trouvé des preuves de l'existence des superpartenaires.

La traque au LHC commence

Mais ce n'est pas le cas. Maria Spiropulu, l'une d'entre nous, garde en mémoire cette nuit de 2009 où elle est allée prendre le poste de chef de quart au détecteur CMS peu avant minuit. Dans la salle de contrôle, une foule de physiciens suivaient chacun un sous-système de l'énorme détecteur complexe de 14 000 tonnes. À deux heures du matin, elle reçut un appel du centre de contrôle du

Une voie alternative : un monde aux dimensions cachées

Le terrain de jeu des physiciens est l'espace-temps où ils vivent et travaillent. Il existe plusieurs bonnes raisons de penser que cet espace-temps comporte quatre dimensions. Mais imaginer qu'il pourrait en cacher davantage apporte des solutions à certains problèmes du modèle standard.

L'intensité des forces électromagnétique et gravitationnelle, celles qui gouvernent l'essentiel de notre vie au quotidien, décroît comme l'inverse du carré de la distance aux sources de ces forces. Cela serait lié au fait que l'espace comporte trois dimensions. La raison est géométrique : d'une part, le champ associé à une source ponctuelle a une symétrie sphérique et, d'autre part, la surface d'une sphère est proportionnelle au carré de son rayon... dans un espace euclidien à trois dimensions. Et pour conserver le flux associé au champ, l'intensité doit décroître comme l'inverse du carré de la distance à la source.

Mais ce raisonnement s'applique à des échelles macroscopiques. Le monde microscopique, celui des particules élémentaires – quarks, leptons, boson de Higgs et autres bosons de jauge –, est le règne de la physique quantique et de la relativité restreinte qui n'ont que faire de notre perception macroscopique de l'espace et du temps. L'intensité de la force électrostatique entre deux électrons est-elle toujours proportionnelle à l'inverse du carré de la distance qui les sépare ? Pas exactement. Il y a des facteurs correctifs, mesurés aujourd'hui avec une grande précision, qui sont d'autant plus importants que les deux électrons sont proches. Doit-on y voir le signe que les électrons ne se propagent plus dans un espace-temps à quatre dimensions ? Non, bien au contraire. Car ces corrections sont exactement celles prédites par le modèle standard et sont la signature du comportement quantique des particules élémentaires. Pourquoi alors imaginer un monde avec des dimensions en plus ? Parce qu'un espace-temps plus grand a bien d'autres avantages.

Ainsi, dès les années 1920, les physiciens Theodor Kaluza et Oskar Klein ont montré que l'existence de dimensions supplémentaires pourrait conduire à une description unifiée des interactions fondamentales. Ils ont montré que les équations à quatre dimensions de la gravité et de l'électromagnétisme pouvaient être déduites simultanément des seules équations de la gravité à cinq dimensions. Dans les années 1980, le développement de la théorie des cordes a permis de comprendre que réconcilier gravité et physique quantique demandait plus d'espace : seuls des espaces-temps à 10, 11 ou 26 dimensions possédaient les propriétés de symétries nécessaires pour rendre la théorie viable.

La nécessité de ces dimensions supplémentaires pour formuler une théorie quantique de la gravitation a encouragé l'émergence d'idées révolutionnaires. À la fin des années 1990, on a compris que ces dimensions supplémentaires pouvaient offrir une alternative à la supersymétrie pour comprendre pourquoi la gravité est une force si faible comparée aux autres interactions fondamentales. Deux scénarios importants ont été proposés.

Selon la première idée, émise par Nima Arkani-Hamed, de l'Institut d'études avancées de Princeton, Savas Dimopoulos, de l'Université Stanford, et Gia Dvali, des Universités de New-York et de Munich, la force de gravitation serait faible parce que diluée dans de grandes dimensions supplémentaires, mais hermétiques à la matière ordinaire et donc à nos sens. Le mariage de la gravité et de la physique quantique aurait lieu à des échelles d'énergies accessibles au LHC. Dans les débris des collisions de protons, les restes de l'évaporation de mini-trous noirs pourraient apparaître.

Une autre idée est celle de Lisa Randall, de l'Université Harvard,

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

CERN de l'autre côté de l'anneau du LHC, long de 27 kilomètres : ils allaient effectuer les collisions de protons aux plus hautes énergies jamais réalisées.

Elle a donné le signal pour qu'on active avec précaution chaque portion du détecteur. Un mur d'écrans a commencé à s'animer, les dispositifs électroniques ultrarapides affichant à toute vitesse les collisions qui se produisaient au rythme de 20 millions par seconde à 100 mètres sous terre. Après avoir traqué la supersymétrie pendant une décennie au collisionneur *Tevatron* du Fermilab, aux États-Unis, elle avait le cœur qui palpitait à l'idée de reconnaître certains motifs caractéristiques de la supersymétrie. Il est tentant d'analyser les collisions par inspection visuelle, mais il est impossible de faire des découvertes de cette façon. Difficile de se raisonner et de rester calme ! Mais elle savait que ce n'était que le début.

Et, quand on construit un collisionneur à sept milliards d'euros avec ses détecteurs géants, on ne le met pas en route en s'attendant à des découvertes la première nuit – ni même la première année. Et pourtant les attentes de M. Spiropulu et ses collègues étaient grandes dès le début.

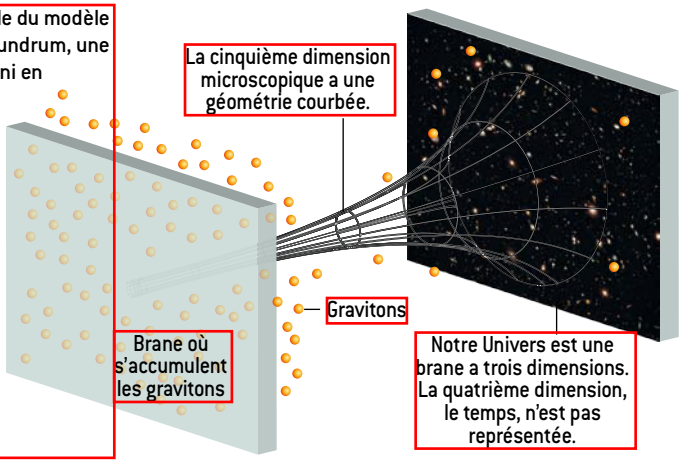
Sur CMS (et sur ATLAS), ils avaient élaboré un plan détaillé des analyses à effectuer sur les données du LHC pour découvrir la supersymétrie. Ils s'étaient préparés pour détecter des particules de matière noire dans des signaux de supersymétrie, non pas directement visibles mais sous forme d'« énergie manquante » : la matière noire n'interagit pas avec les détecteurs, mais emporte une partie de l'énergie totale de la collision, ce qui trahit leur présence (d'autres types d'expériences traquent la matière noire, *voir la figure 3*).

Nous étions alliés jusqu'à rédiger une ébauche d'article annonçant la découverte.

Cet article n'a pas été écrit, car les physiciens du LHC n'ont toujours rien trouvé. Ils procèdent de façon systématique et rigoureuse, ce qui leur a permis d'éliminer de nombreux scénarios possibles. Les superpartenaires ne peuvent pas être trop légers, car ils auraient déjà été mis en évidence. Et on suppose qu'ils ne peuvent pas être trop lourds, parce qu'alors ils ne satisferaient pas les critères nécessaires pour supprimer les effets gênants des particules virtuelles. Si le LHC ne les découvre pas dans sa prochaine campagne, la crise dans ce domaine de la physique prendra de l'ampleur.

Malgré ces difficultés, les théoriciens ne sont pas prêts à abandonner la supersymétrie, même s'ils doivent se replier sur une version plus générale qui n'a pas toutes les

DANS LA VERSION originale du modèle de Lisa Randall et Raman Sundrum, une brane (un objet étendu défini en théorie des cordes) à trois dimensions contient notre Univers. Ce dernier est séparé d'une autre brane par une cinquième dimension fortement courbée. La gravité est faible dans notre brane car les gravitons, particules hypothétiques véhiculant cette force, se concentrent sur l'autre brane.



et Raman Sundrum, de l'Université du Maryland : la gravité est faible parce que les dimensions supplémentaires seraient fortement courbées sous l'effet d'une énergie du vide importante. Cette courbure éloignerait les gravitons – les hypothétiques particules véhiculant la gravité qui peuvent se déplacer dans les dimensions supplémentaires – de la matière ordinaire. Cela réduirait l'intensité de la gravité. Même si ce modèle prédit lui aussi de nouvelles particules accessibles aux détecteurs d'ATLAS et CMS, la gravitation conserverait un comportement classique jusqu'à des énergies proches de l'échelle de Planck, soit 10^{19} gigaélectronvolts.

Le cadre de ces deux scénarios est suffisamment riche pour, par exemple, expliquer l'abondance de la densité de matière noire dans l'Univers ou rendre compte de l'accélération de l'expansion de l'Univers.

Toutefois la récente observation de la polarisation des photons du fond diffus cosmologique par l'expérience BICEP2, interprétée comme la manifestation d'ondes gravitationnelles primordiales engendrées à l'époque de l'inflation, semble peu compatible avec une faible échelle de gravitation quantique telle que la prédit le premier scénario.

Le champ d'application des théories physiques intégrant des dimensions supplémentaires s'est encore élargi lorsqu'on a compris que ces dernières pouvaient être un artefact mathématique pour décrire des systèmes fortement couplés dans un simple espace à quatre dimensions. Ce nouveau chapitre a débuté avec la conjecture audacieuse d'un théoricien des cordes, Juan Maldacena, à Princeton, qui a postulé en 1997 que, de la même façon qu'en mécanique quantique ondes et particules sont deux descriptions équivalentes d'une même réalité, une nouvelle force peut être décrite de façon équivalente par une nouvelle dimension d'espace. Cette dualité est très féconde pour décrire une interaction intense qui ne peut être appréhendée par les méthodes de calcul habituelles, et offre une description géométrique dans laquelle les calculs peuvent être conduits simplement. Cette approche a été appliquée avec succès pour étudier, par exemple, l'interaction forte dans le cadre de la chromodynamique quantique. Ces idées ont même trouvé des applications pour comprendre certaines propriétés de matériaux supraconducteurs et de superfluides.

– Christophe Grojean
Institut catalan de recherches et d'études avancées et Institut de physique des hautes énergies de Barcelone

qualités qu'on attendait de la supersymétrie naturelle. Rappelons que la supersymétrie est avant tout un cadre qui permet de développer des modèles du monde des particules, et non un modèle en lui-même, si bien que les données futures pourraient conforter l'idée de supersymétrie même si tous les modèles actuels sont exclus.

Nima Arkani-Hamed, physicien à l'Institut d'études avancées de Princeton, aux États-Unis, expliquait dans un exposé ce qui pourrait être l'avenir de la supersymétrie : « Si on ne trouve pas de trace de la supersymétrie au LHC, alors les théoriciens bâtiront de nouveaux modèles supersymétriques qui placent les superpartenaires juste hors de portée des expériences. »

Cette fidélité indéfectible à la supersymétrie est partagée. Cependant, les physiciens des particules admettent que l'idée de la supersymétrie naturelle est déjà mal en point et qu'elle finira dans les oubliettes de l'histoire si l'on ne trouve pas bientôt des superpartenaires.

Et si la supersymétrie ne décrivait pas le monde, quelles sont les alternatives ? Comme nous l'avons expliqué, le modèle standard pose des questions sans réponses telles que la stabilité de la masse du boson de Higgs et pourquoi elle ne devient pas très grande. Il est donc indispensable de s'aventurer au-delà du modèle standard. Voici trois pistes possibles. Toutes entraînent la réflexion en physique fondamentale et en cosmologie dans des directions radicalement différentes.

SI LA SUPERSYMÉTRIE EST ABSENTE

à la fin de cette campagne, la physique fondamentale se trouvera à la croisée des chemins : abandonner la supersymétrie ou persévérer.

Une première approche est d'invoquer le multivers : notre Univers ne serait qu'un parmi un très grand nombre. Pourquoi cette idée ? Les intensités des forces fondamentales et les valeurs des masses des particules font intervenir des nombres dont l'origine est un mystère. Et la moindre variation sur ces nombres aurait conduit à un univers très différent. Par exemple, avec d'autres valeurs, même légèrement différentes, les atomes seraient instables et la vie ne pourrait pas apparaître. Dans le jargon de la physique théorique, on dit que l'Univers est « finement ajusté ». On peut tenter d'expliquer ces valeurs, comme avec la supersymétrie, ou considérer qu'elles sont le fruit du hasard. Cette idée n'est pas très satisfaisante, mais elle devient plus séduisante si l'on postule un multivers.

Dans ce scénario, le Big Bang a produit non seulement l'Univers que nous voyons, mais aussi un grand nombre d'autres univers – que nous ne percevons pas. Dans ce cas, la réponse aux questions telles que « Pourquoi l'électron a-t-il cette masse-là ? » serait du type : « C'est juste le hasard, d'autres parties du multivers ont des électrons de masse différente. » Ces supposés ajustements fins qui nous intriguent tant ne seraient que des accidents de l'histoire cosmique. Seuls les univers dont les paramètres ont les bonnes valeurs, compatibles avec le développement de la vie, contiendront à terme des physiciens qui vont s'étonner de ne pas trouver la supersymétrie naturelle au LHC.

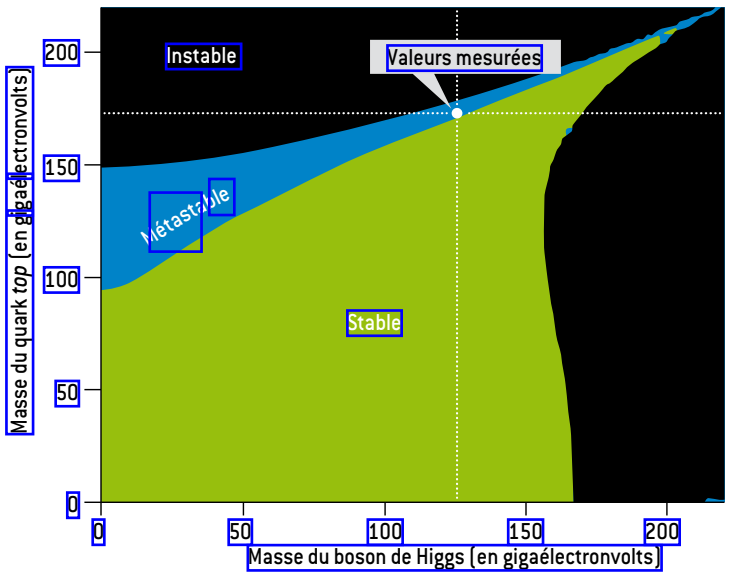
Pour de nombreux physiciens, l'hypothèse du multivers est troublante et se rapproche trop de l'idée que les anomalies de la physique des particules sont dues à des « armées d'anges invisibles ». Comme le dit le physicien américain et prix Nobel David Gross, faire appel au multivers, à des conditions initiales impossibles à connaître, c'est un peu « s'avouer vaincu et jeter l'éponge ».

Une autre possibilité pour obtenir les valeurs des paramètres du modèle standard est explorée par Lisa Randall, de l'Université Harvard, et Raman Sundrum, de l'Université du Maryland. Ces deux physiciens ont montré qu'une dimension supplémentaire présentant une géométrie « tordue » peut expliquer la faiblesse de la gravitation comparée aux autres forces connues. Si de telles dimensions supplémentaires sont microscopiques, nous pourrions ne pas les avoir encore remarquées, mais leur taille et leur forme pourraient jouer un rôle important en physique des particules de haute énergie.

Dans ces modèles, plutôt que de trouver des superpartenaires au LHC, nous pourrions découvrir des modes de Kaluza-Klein, des particules exotiques lourdes dont la masse correspond en fait à l'énergie de leur mouvement dans les dimensions supplémentaires *(voir l'encadré pages 44 et 45)*.

AU BORD DE LA CATASTROPHE

Le champ de Higgs, associé au boson du même nom, est un champ qui imprègne tout l'espace. Il confère aux particules leur masse et semble stable. Mais les masses mesurées du boson de Higgs et du quark *top* (une autre particule élémentaire) indiquent que le champ de Higgs se trouve dans un état métastable (stable pendant un temps limité). Des effets quantiques pourraient le faire passer dans un état plus stable, d'énergie inférieure. La masse de toutes les particules changerait alors subitement, ce qui transformerait brutalement l'Univers. La supersymétrie contribuerait cependant à stabiliser le champ de Higgs.



© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

Enfin, il est possible que vouloir à tout prix supprimer les effets des particules virtuelles, comme en supersymétrie, n'est pas la bonne idée. Une nouvelle approche consiste à intégrer ces effets pour expliquer d'où vient la masse. L'idée est similaire à ce qui se passe quand les physiciens calculent la masse du proton. Cette particule n'est pas élémentaire. Il s'agit d'un assemblage de trois quarks, qui ont une masse minuscule, et de gluons, dont la masse est nulle. Or le proton est beaucoup plus lourd que la somme des quarks et des gluons dont il est composé. D'où vient cette masse ? Elle vient de l'énergie des champs associés à l'interaction forte qui assure la cohésion du proton. Notre compréhension de ces champs nous permet de prédire précisément la masse du proton.

D'ordinaire, nous pouvons calculer des masses à partir d'autres masses. Cependant, le modèle standard ne permet pas de prévoir la masse du boson de Higgs – nous devons la mesurer. Il semble étonnant que l'on puisse calculer la masse du proton, mais pas celle du boson de Higgs. À partir des travaux de William Bardeen, physicien au Fermilab, quelques théoriciens suggèrent que la masse du boson de Higgs est déterminée par un processus analogue à celui utilisé pour le proton, et qui est nommé transmutation dimensionnelle.

Une telle approche permet de conserver les effets utiles des particules virtuelles tout en évitant ceux qui sont désastreux. En revanche, elle nécessite d'abandonner certaines autres idées véhiculées par la supersymétrie, telle l'unification des lois de la physique à très haute énergie. Et le lien entre la physique quantique et la relativité générale, qui se dérobe à nous depuis si longtemps, en devient plus mystérieux encore. Toutefois, ce modèle a d'autres avantages, notamment celui de proposer un candidat à la matière noire. Sa masse découlerait de ses interactions avec la matière ordinaire, interactions qui seraient véhiculées par le boson de Higgs. Cette prédiction spectaculaire sera testée au LHC ainsi que dans des expériences souterraines de détection de matière noire.

La supersymétrie n'a pas dit son dernier mot. Plusieurs indices suggèrent qu'elle pourrait tout de même s'intégrer aux lois de la physique. Parmi les observations les plus récentes, on peut évoquer le rôle de la masse du boson de Higgs et son impact sur la stabilité de l'Univers.

La supersymétrie dans l'hélium 3

Récemment, Tarun Grover, de l'Université de Californie à Santa Barbara, et ses collègues ont montré que certains phénomènes dans le domaine de la matière condensée peuvent être théoriquement décrits par la supersymétrie. Ils ont analysé ce qui se passe dans de l'hélium 3 superfluide, à une température proche du zéro absolu. Les atomes (des fermions, leur spin ou moment cinétique intrinsèque étant demi-entier) s'associent par paires pour former des bosons (de spin entier), sauf sur les bords de l'enceinte. En présence d'un champ magnétique, les fermions des bords disparaissent. Lors de cette transition, le comportement des fermions et des bosons est analogue à celui de superpartenaires.

BIBLIOGRAPHIE

J. Ellis, **Le boson de Higgs, et après ?**, *Pour la Science*, n° 419, septembre 2012.

G. Ellis, **Le multivers existe-t-il ?**, *Pour la Science*, n° 412, février 2012.

G. Kane, **Supersymétrie : les lois ultimes de la nature dévoilées**, Le Pommier, 2003.

N. Arkani-Hamed *et al.*, **Les dimensions cachées de l'Univers**, *Pour la Science*, n° 276, octobre 2000.

La découverte du boson de Higgs implique qu'il existe un champ associé à cette particule qui est présent partout dans l'Univers. L'interaction des particules avec ce champ leur confère leur masse. Cela signifie que le vide est en réalité un endroit où il se passe beaucoup de choses, où la combinaison du champ de Higgs et des particules virtuelles produit une dynamique complexe. Mais cette dynamique est-elle stable ? Si elle ne l'est que temporairement, on parle d'équilibre métastable ; le champ de Higgs pourrait alors subir une « transition de phase » et basculer dans une configuration plus stable. L'énergie associée au champ changerait de valeur ainsi que la masse de toutes les particules et la physique de l'Univers, qui d'une certaine façon repartirait de zéro. La supersymétrie permet de stabiliser le vide et d'empêcher de tels accidents.

Un futur incertain

En l'absence de supersymétrie, la stabilité du vide dépend beaucoup de la masse du boson de Higgs. Or la masse que l'on a mesurée correspond à une frontière, impliquant un vide durable, mais au bout du compte instable *(voir l'encadré page ci-contre)*. Un boson de Higgs plus lourd impliquerait un univers stable, alors qu'un boson de Higgs plus léger conduirait à terme à la catastrophe. La nature essaie de nous dire quelque chose, mais nous ignorons quoi.

Les physiciens attendent donc l'issue de la prochaine campagne du LHC. Si des superpartenaires sont observés, les appréhensions actuelles des physiciens des particules céderont la place à une excitation incroyable d'avoir enfin ouvert une brèche vers le monde supersymétrique. Et ce sera le début d'une grande aventure intellectuelle.

Mais si l'on ne trouve pas ces superpartenaires, la physique des particules sera confrontée à une crise. Cette perspective inspire déjà une réflexion radicalement nouvelle sur les phénomènes qui sous-tendent la trame de l'Univers. Une meilleure compréhension des propriétés du boson de Higgs sera cruciale pour construire cette nouvelle voie. Et les signaux astrophysiques et cosmologiques de la matière noire pourraient nous baliser le chemin à suivre. ■

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

du

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

Markus Hilgert

En Mésopotamie, l'écriture cunéiforme a été pratiquée pendant des millénaires. L'analyse des textes permet de reconstituer comment les scribes l'apprenaient. Elle indique aussi comment se prononçaient les langues transcrites en cunéiforme.

L'apprentissage cunéiforme

C'est à partir de 3300 avant notre ère environ que l'on a commencé à écrire sur l'argile en Mésopotamie. Cela durera quelque 3 500 ans… Grâce à ce système d'écriture, des scribes rédigeaient missives et contrats, notaient les lois et les protocoles à suivre pendant les rituels, consignaient les observations astronomiques, le savoir médical, transmettaient des mythes et des œuvres littéraires…

À l'aide d'un stylet taillé dans le roseau, le calame, ils imprimaient sur des tablettes façonnées dans l'argile fraîche des signes en forme de coins, de clous verticaux ou horizontaux, ou de têtes-de-clou. Une fois inscrites, les tablettes d'argile étaient simplement mises à sécher au soleil. Cette façon de transmettre de l'information a beau sembler fragile, elle s'est révélée la plus durable de toutes celles que l'humanité a jamais employées !

1. CETTE LISTE DE NOMS de fonctions date de 3300 avant notre ère ; découverte à Uruk, elle débute par les titres de hauts fonctionnaires de la ville, puis ceux en charge de la justice, de l'élevage et des terres agricoles.

L'ESSENTIEL

- **À la fin du IVe millénaire avant notre ère, apparaît dans les villes de basse Mésopotamie un système d'écriture à base de signes en forme de clous imprimés dans l'argile.**
- **Le support argileux est si durable que les textes cunéiformes sont devenus la principale source d'information sur le Proche-Orient ancien.**
- **La formation à l'écriture cunéiforme commençait par l'apprentissage du sumérien.**
- **L'analyse linguistique reconstitue en partie la prononciation du sumérien et de l'akkadien.**

Sauf mention contraire, les photos appartiennent à Uruk. Musées de la ville de Berlin

La maîtrise de l'écriture cunéiforme et de toutes ses applications exigeait une longue formation. Comme nous allons le voir, l'étude des textes scolaires servant à l'apprentissage des scribes dévoile comment se déroulait leur formation ; et l'analyse minutieuse de ces cas d'école nous indique même comment se prononçaient des langues disparues.

En effet, si l'écriture cunéiforme a été inventée en basse Mésopotamie, elle a servi à transcrire les langues de tout le Proche-Orient ancien. Parmi elles, il faut citer au moins le sumérien, une langue d'origine inconnue, l'akkadien, une langue sémitique comme l'hébreu et l'arabe, et le hittite, qui appartient à la branche anatolienne des langues indo-européennes.

Pendant la seconde moitié du IIe millénaire avant notre ère, l'écriture cunéiforme était le support privilégié des échanges diplomatiques dans tout le Proche-Orient, comme l'illustrent les archives en cunéiforme découvertes à Amarna, la capitale du pharaon Akhénaton (de 1355 à 1337 avant notre ère). Ces tablettes constituent la plus importante source dont nous disposons

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

2. CET ACTE ADMINISTRATIF, l'un des plus vieux du monde (3300 avant notre ère) provient d'Uruk. Quatre impressions coniques sont flanquées de trois signes non élucidés. En haut, il pourrait s'agir d'une jarre contenant un liquide ; en bas, d'un enclos à moutons.

3. CE FRAGMENT de la 22e tablette de la liste lexicale suméro-akkadienne *urra-hubullu* contient des noms de pays, de cours d'eau et d'astres, ainsi que, sur la troisième colonne, de canaux, tel le « canal propre » ou encore le « canal sublime ». Rédigé dans le premier tiers du Ier millénaire avant notre ère, il a été découvert au début du XXe siècle dans les ruines d'Assur (Iraq).

sur les relations politiques entre l'Égypte, les royaumes mésopotamiens et l'empire hittite *(voir la figure 6)*.

Aujourd'hui, le corpus cunéiforme comprend des centaines de milliers de textes, et les archéologues ou les pillards (en Iraq et depuis peu en Syrie aussi) en découvrent constamment. Or le corpus déjà existant n'a pas encore été étudié systématiquement, même dans les grandes lignes... Aussi la recherche en assyriologie, c'est-à-dire l'étude des langues et des cultures du Proche-Orient ancien, a-t-elle un bel avenir.

Nous devons l'importance de ce corpus aux avantages techniques de l'écriture cunéiforme. Son matériau de base est l'argile, que l'on trouve partout en Mésopotamie. Souvent de bonne qualité, elle est imputrescible et ne coûtait que la peine de l'extraire, alors que les supports organiques utilisés ailleurs, tels la peau animale (l'ancêtre du parchemin) ou encore les rouleaux de papyrus égyptiens, étaient onéreux, fragiles et peu durables. Les tablettes d'argile, une fois sèches, étaient au contraire très résistantes au temps.

Cette remarquable persistance produit souvent sur les assyriologues la curieuse impression de lire un texte qui vient d'être inscrit dans l'argile, alors que son auteur peut être mort depuis 5000 ans… Du reste, on appréciait dès l'Antiquité le fait que les tablettes soient si durables : à ces époques où les temps d'innovation ne se mesuraient pas en années comme aujourd'hui, mais en siècles, on aimait pouvoir se référer au passé. Ainsi, il arrivait que l'on envoie chercher aux archives le texte d'un décret pris par un roi mort depuis longtemps afin de s'y référer. La conservation des richesses culturelles du passé avait aussi son incidence sur les œuvres littéraires : accumulé pendant des années, le matériau constituant les œuvres était retravaillé dans une forme et un style correspondant à l'esprit du temps.

POUR LES ANCIENS MÉSOPOTAMIENS, l'écriture cunéiforme représentait une force ordonnatrice du monde.

Cet intérêt pour le passé était partout présent : quand, lors de la rénovation d'un temple, d'un palais ou des murs d'une ville, les ouvriers tombaient sur des documents anciens, on les traitait avec le plus grand respect et on les faisait étudier par les érudits, pour les adopter éventuellement comme modèle. Afin de conserver l'esprit émanant des textes de leurs illustres prédécesseurs, les scribes ne reproduisaient pas seulement leur style archaïque, mais aussi leur façon d'inciser la pierre, le métal ou des briques d'argile ensuite glaçurées. Pour les anciens Mésopotamiens, l'écriture cunéiforme représentait une force ordonnatrice du monde.

De fait, il n'existe pratiquement aucun domaine d'activité humaine qui n'ait pas eu sous une forme ou une autre sa traduction en textes cunéiformes. La recherche actuelle sur les sociétés antiques du Proche-Orient peut donc se référer autant à des échanges épistolaires qu'à des documents administratifs, commerciaux, juridiques, scientifiques, littéraires, mythiques, etc. En témoignent le texte de la célèbre épopée de Gilgamesh *(voir la figure 4)*, ces chansons d'amours, ces hymnes, ces recueils d'aphorismes, ces traités concernant les plantes, les minéraux, les animaux, cette liste de noms de métiers *(voir la figure 1)*, ces textes astronomiques ou portant sur cet art compliqué qu'était la divination en Mésopotamie. Le Code de Hammurabi (une stèle noire conservée au musée du Louvre), un recueil des lois d'un souverain de Babylone du XVIIIe siècle avant notre ère, est sans doute le texte juridique mésopotamien le plus remarquable.

Dans l'écriture cunéiforme, le signe le plus simple est un clou vertical 𒁹, que l'on nomme DISH (les assyriologues écrivent les noms des signes en majuscules et leur valeur syllabique en minuscules). Beaucoup de signes consistent en deux ou trois clous, certains horizontaux, certains en biais, et l'on rencontre couramment des assemblages de dix clous ou plus. Pendant toute la période où le cunéiforme était usité,

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

4. L'ÉPOPÉE DE GILGAMESH raconte la quête vaine d'un roi légendaire pour devenir immortel. Sur cette tablette datant du Ier millénaire avant notre ère, deux traits entourent la ligne suivante : « Ninurta ouvrit la bouche et parla, disant au guerrier Enlil : qui, sinon Ea, parvient à cela, car seul Ea connaît tous les arts ! ».

plusieurs centaines de signes ont régulièrement été employés, même si, dans un texte administratif simple, une trentaine suffisaient. Leurs formes et la façon de les inscrire changeaient régulièrement, de sorte que les chercheurs parviennent souvent à dater un texte à partir du style de son écriture.

Une écriture difficile à apprendre

Même si elle était beaucoup employée, l'écriture cunéiforme était tout sauf simple à apprendre. Ses nombreuses ambiguïtés, surtout, donnaient du fil à retordre aux apprentis scribes. Quelle est leur origine ? Les inventeurs du système cunéiforme, les Sumériens, se servaient de logogrammes (un signe notant un mot) pour écrire leur langue qui était majoritairement monosyllabique. Or les Akkadiens, qui ont repris les mêmes signes et les sons correspondants, s'en sont servis pour transcrire leur langue sémitique. C'est pourquoi la plupart des signes cunéiformes représentent à la fois des syllabes et des mots.

Dans chacune de ces deux fonctions, ils peuvent aussi avoir plusieurs valeurs, ce qui ajoute à la confusion lors de la lecture. Le système cunéiforme comporte en outre de nombreux déterminatifs, qui se plaçaient avant ou après un mot pour en préciser la catégorie sémantique. Ainsi, dans les textes akkadiens du Ier millénaire avant notre ère, le signe qui se lisait GISH en sumérien et qui signifiait « bois » se traduisait par *itsu* en akkadien ; il pouvait aussi se lire en akkadien avec les valeurs « iz », « is », « its », « ez », « es » ou « ets ». On pouvait aussi s'en servir comme déterminatif pour signaler les objets de bois. Lorsque, par exemple, on l'apposait devant le signe KU afin de former la combinaison GISH KU , il produisait grâce à sa fonction de déterminatif le mot akkadien « kakku » signifiant « massue » ou « arme ». La valeur que revêt un signe cunéiforme ne peut, le plus souvent, qu'être déduite du contexte.

Des tablettes d'exercices

Ces difficultés d'interprétation se posaient déjà dans l'Antiquité. Composer ou lire un texte cunéiforme exigeait pour cette raison de la concentration, de l'agilité intellectuelle, et énormément d'entraînement. Qui voulait acquérir ces compétences devait commencer dès l'enfance. Masculins pour la plupart, les élèves provenaient de la petite classe supérieure urbaine, qui était formée surtout de fonctionnaires administratifs ou religieux. Les futurs scribes devaient suivre une formation de plusieurs années, qui variait suivant les milieux. Or la découverte de tablettes d'exercice nous permet aujourd'hui de reconstruire de façon fiable la succession des leçons.

Tout comme les enfants apprennent à tracer les lettres à l'école maternelle, l'apprentissage commençait par des exercices de tracés de lignes de clous verticaux, horizontaux, etc. C'est d'ailleurs ce que traduit un proverbe du Proche-Orient ancien : « Le début de l'art d'écrire consiste en un clou vertical. » Comme l'a montré dans son travail de doctorat Petra Gesche, de l'Université de Heidelberg, à ce stade peu avancé de leur formation, les élèves disposaient les signes au hasard, sans respecter de règles.

Dès que les élèves étaient à l'aise avec une tablette dans une main et le stylet dans l'autre, ils s'essayaient à l'écriture en ligne ainsi qu'aux premières combinaisons de signes. Sur une tablette du début du IIe millénaire avant notre ère, un DISH est par exemple suivi par un clou horizontal prolongé par un chevron, ce qui constitue le signe BAD , puis, un peu plus tard, venaient les signes A , ME , et PAP . La série de signes

L'AUTEUR

Markus HILGERT est assyriologue et enseigne à l'Université de Heidelberg, en Allemagne.

BIBLIOGRAPHIE

P. Bordreuil, F. Briquel-Chatonnet et C. Michel (dir.), **Les débuts de l'histoire. Civilisations et cultures du Proche-Orient ancien**, Khéops, 2014.

D. Charpin, **Lire et écrire à Babylone**, PUF, 2008.

B. Lion et C. Michel (dir.), **Les écritures cunéiformes et leur déchiffrement**, De Boccard, 2008.

Site du SOAS de l'Université de Londres (lectures à haute voix de prières et d'hymnes en sumérien et akkadien) : https://www.soas.ac.uk/baplar/recordings/

ME-ME, PAP-PAP et A-A était aussi très pratiquée, car elle correspond aux trois premières lignes d'une liste de signes souvent utilisée pour se préparer à écrire des noms propres et des expressions brèves.

Quand un jeune apprenti scribe maîtrisait ce niveau, son initiation au sumérien débutait. Cette langue n'était plus parlée depuis le tout début du IIe millénaire avant notre ère ; cela n'a pas empêché qu'elle conserve son importance jusqu'à la disparition de la tradition cunéiforme, au Ier siècle de notre ère. Or le sumérien différait fondamentalement des langues sémitiques pratiquées après elle au quotidien en Mésopotamie : l'akkadien et l'araméen. Par exemple, l'expression « ensemble avec tes frères plus âgés » se formulait en sumérien « frères grands tiens pluriel ensemble avec » *(schesch gal-zu-ne-da)*, mais en akkadien « ensemble avec frères tes grands » (*itti ahhika rabuti*).

Fidélité aux origines sumériennes

Ces façons différentes de disposer les mots dans la phrase découlent d'abord du fait que les textes sumériens ont été les premiers écrits en cunéiforme, plusieurs siècles avant les textes akkadiens. C'est pourquoi tous les signes cunéiformes se nommaient en sumérien et se décrivaient à l'aide de concepts sumériens. Dans la tradition mésopotamienne, il était donc indispensable d'apprendre d'abord le sumérien pour apprendre à écrire. Un proverbe sumérien du début du IIe millénaire l'exprime : « Un scribe qui ne sait pas le sumérien, mais quel scribe est-ce là ? ».

L'emploi d'une langue morte datant des débuts de la civilisation mésopotamienne avait aussi des motivations idéologiques. Les rois amorrites du début du IIe millénaire avant notre ère – et, partant, l'élite qu'ils recrutaient au sein de leurs familles – descendaient d'un peuple sémite d'éleveurs nomades, arrivé en Mésopotamie après l'époque sumérienne. Ils parlaient l'amorrite au quotidien, mais, pour se donner une légitimité et assurer la continuité culturelle, ils se sont inspirés dans leurs pratiques officielles de celles de leurs prédécesseurs sumériens. Ces rois commandaient ainsi des rapports, réalisés en s'alignant sur la diction, les métaphores et les caractères religieux des rapports anciens.

Jusqu'à la fin de la culture assyro-babylonienne, vers le tournant de notre ère, le sumérien était la langue dans laquelle les prêtres communiquaient avec les dieux et dans laquelle on pouvait implorer le pardon ou l'aide d'une divinité.

Les maîtres ne confrontaient les apprentis scribes à des textes difficiles que très progressivement. On préférait commencer par leur faire étudier une liste de noms propres, sumériens en général, par exemple Bawu-ninam (la déesse Bawu est souveraine) ou encore Bawu-teshgu (la déesse Bawu est ma force vitale). Toutes les listes d'exercices qui nous sont parvenues sont organisées de la même façon : le début de chaque ligne est signalé par un clou vertical ; une séquence de cinq à six signes suit. Il arrivait, mais c'était le cas surtout dans la ville de Nippur, que l'on écrive en abrégé ; l'analyse de toute une série de textes ainsi rédigés a montré que l'on employait pour cela des noms propres dont l'usage était abandonné depuis longtemps, mais qui étaient néanmoins familiers à tous les anciens apprentis scribes, qui devaient pouvoir les écrire de mémoire et très vite.

5. CE CLOU DE FONDATION en bronze provenant d'Uruk et datant de 2100 avant notre ère environ montre le roi Shulgi portant un panier de briques d'argile. Une inscription en sumérien se lit : « Pour Inanna, la maîtresse de l'Eanna, sa déesse, l'homme fort Shulgi, roi d'Ur, de Sumer et d'Akkad, a rénové l'Eanna et réédifié sa muraille ».

Des exercices à base de listes

D'un point de vue didactique, ces exercices à base de listes étaient utiles. Comme les exemples donnés plus haut le montrent, les noms des listes consistaient en de courtes phrases, ce qui permettait d'apprendre les bases de la grammaire et de l'orthographe sumériennes, ainsi qu'un petit vocabulaire. Ces exercices donnaient aussi de premiers aperçus des représentations théologiques et anthropologiques du passé idéalisé de Sumer.

L'apprentissage se poursuivait par d'autres listes pouvant contenir plusieurs milliers d'entrées. Leur format, qui ne comprenait à l'origine qu'une seule liste, s'est enrichi au cours des siècles de plusieurs nouvelles colonnes contenant des explications et des informations supplémentaires *(voir la figure 3)*. Tout cela ne pouvant suffire à appréhender la complexité d'un texte sumérien, les maîtres d'écriture ajoutaient sans doute de nombreuses précisions orales.

Ces listes livrent en outre des indices sur la façon dont le sumérien et l'akkadien ont pu se prononcer. Pour le déterminer, les linguistes rassemblent dans ces textes d'exercices toutes les informations relatives aux valeurs d'un signe syllabique, puis analysent ce qui modifie la voyelle dans toutes les façons d'écrire un ensemble consonne-voyelle.

Une liste de signes très utilisée dans la Mésopotamie de la seconde moitié du IIe millénaire avant notre ère nous a par exemple permis de déduire la prononciation du signe grâce aux deux signes successifs et . Le signe apparaît dans une lettre akkadienne dans une position où le contexte suggère la négation « pas ». Or dans les langues sémitiques, les négations sont en général formées sur le principe d'un « l » accompagné d'une voyelle ; dans l'arabe, par exemple, *la* vient pour « non ».

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

Les pratiques variables de l'écriture : le cas des marchands assyriens

S'il est facile d'enfoncer un stylet dans l'argile fraîche pour former des signes en forme de coin, la rédaction de textes littéraires, de recueils divinatoire ou la résolution de problèmes mathématiques nécessitaient des connaissances approfondies dont l'acquisition se faisait en suivant les trois niveaux du cursus scolaire : élémentaire, intermédiaire, avancé.

La plupart des élèves arrêtaient leurs études à la fin du niveau élémentaire, celui au cours duquel ils avaient mémorisé des listes de mots, des tables métrologiques et numériques. Ils étaient alors capables de rédiger de courts textes et d'effectuer des calculs simples.

En outre, l'apprentissage de l'écriture et du calcul, chez un maître ou dans le cadre familial, était adapté au milieu socioculturel dans lequel il était dispensé. Prenons pour exemple les marchands assyriens qui, depuis Aššur, sur le Tigre, pratiquaient le commerce à longue distance avec l'Anatolie centrale. Ils avaient installé sur place des comptoirs de commerce dont le centre administratif se trouvait à Kaniš, non loin de l'actuelle Kayseri. Là, dans leurs maisons, les archéologues ont mis au jour 22 500 tablettes. Ces textes – des lettres reçues de leurs familles et collègues demeurés à Aššur, des contrats et des notices comptables – datent de la première moitié du XIX[e] siècle avant notre ère. Cette documentation privée paléo-assyrienne constitue le premier témoignage écrit d'un système commercial complexe fondé sur des échanges internationaux. Quelques textes scolaires figurent au nombre des trouvailles : il s'agit de listes de mots, de morceaux de phrases, d'une liste progressive des poids, et surtout de petits exercices de calcul. Contrairement aux écoliers babyloniens du Sud mésopotamien qui avaient une formation plutôt académique, les apprentis marchands assyriens recevaient une formation professionnelle. Les listes lexicales comportent les signes sumériens des métaux et pierres qu'ils négociaient. La table métrologique propose une progression des poids correspondant non seulement à ceux que l'on trouve dans les textes, mais aussi aux poids en pierre exhumés lors des fouilles. Les exercices de calcul proposent des conversions : il s'agit de calculer le poids d'argent nécessaire à l'achat d'un poids d'or, d'étain ou de cuivre. Les phrases apprises par cœur, proches de la langue parlée, sont celles qui figurent dans la correspondance des marchands et de leurs épouses. Le syllabaire employé par les Assyriens pour écrire leurs tablettes était réduit : pas plus de 150 à 200 signes, le plus souvent des syllabes simples et peu de logogrammes. La quantité de missives découvertes à Kaniš implique qu'une proportion non négligeable de la population assyrienne était en mesure d'écrire. Beaucoup de lettres semblent avoir été écrites sans l'intermédiaire d'un professionnel. En fonction du cursus scolaire suivi, il existait donc une grande variété de pratiques de la langue et de l'écriture.

Cécile Michel
CNRS, Archéologie et sciences de l'Antiquité (UMR 7041), Nanterre

S'agissant de la prononciation de , nous avons aussi un repère. Il apparaît comme substantif dans un autre texte akkadien plus ancien de plusieurs siècles. Il devrait toutefois y figurer sous la forme d'un accusatif (complément d'objet direct), que beaucoup de langues sémitiques marquent par la terminaison « a ». D'autres considérations nous ont en outre appris qu'en vieil akkadien, la marque de la déclinaison est augmentée par un « m ». On en déduit que le signe a dû se prononcer « am ».

Un dernier indice est livré par une convention de l'écriture cunéiforme : les syllabes du type consonne-voyelle-consonne sont souvent représentées par deux signes syllabiques du type consonne-voyelle et voyelle-consonne, ce qui double donc la voyelle en écriture, mais pas dans la prononciation. Tout cela conduit à conclure que les deux signes et se lisaient « la-am », et donc que le signe se prononçait « lam ». Par des raisonnements similaires, les chercheurs ont aujourd'hui rendu possibles la lecture et la prononciation des textes cunéiformes *(voir le site Internet indiqué dans la bibliographie)*.

Le grand nombre d'homophones du sumérien et d'autres ambiguïtés rendent les prononciations anciennes ainsi reconstruites incertaines, ce dont les linguistes sont bien sûr très conscients. Les significations multiples du système d'écriture et ses règles orthographiques très souples par comparaison à d'autres langues ne permettent pas de tirer des conclusions définitives. Toutefois, dans l'Antiquité, ces ambiguïtés avaient des avantages, car elles permettaient de jouer avec les mots.

Pour gagner du temps et de la place, les fonctionnaires ont en effet commencé à employer des logogrammes – des signes représentant des mots – tandis que les auteurs littéraires ou scientifiques employaient au contraire un style compliqué, non seulement pour manifester leur culture, mais aussi afin de combiner plusieurs niveaux de lectures.

Une chose est sûre, le déchiffrement des textes cunéiformes occupera les assyriologues encore longtemps. Et afin de mieux appréhender ces textes, il faudrait pouvoir leur associer le contexte archéologique de leur découverte. Espérons que ce sera un jour possible. ■

6. CETTE TABLETTE, retrouvée dans les archives de la chancellerie d'Amarna en Égypte, illustre la diplomatie du II[e] millénaire avant notre ère. Le souverain de Mittani (au Nord-Est de la Syrie actuelle) y salue le pharaon Amenhotep III, l'appelant « frère » ; il se considérait donc comme son égal.

Des corrélations à la causalité

Isabelle Drouet

À partir de données statistiques, peut-on déterminer les liens de cause à effet entre des phénomènes et, si oui, comment ? Les philosophes des sciences ont renouvelé les réflexions sur cette question.

Établir un lien causal entre deux événements, phénomènes ou situations est une opération mentale qui est au fondement de notre compréhension du monde et de notre capacité à agir sur lui. Le plus souvent, cette opération est menée de façon intuitive et inconsciente. Par exemple, lorsque la main lâche un objet, ce dernier tombe ; en conséquence, le cerveau humain comprend très vite, dès le plus jeune âge, que le fait de lâcher un objet entraîne sa chute.

Mais les relations de cause à effet ne sont pas toujours aussi faciles à établir *(voir la figure 1)*. Bien souvent, les scientifiques ont accès à des liens statistiques entre les phénomènes qu'ils étudient, relations que l'on nomme corrélations et qui les renseignent sur les probabilités (ou les fréquences d'occurrence) des phénomènes en question. Le défi consiste alors à identifier correctement les relations de causalité, c'est-à-dire à déterminer, dans l'ensemble des phénomènes considérés, lesquels sont les causes et lesquels sont les effets. Quelle est la vision actuelle sur cette question ? Pour l'expliquer, nous allons prendre un

L'ESSENTIEL

- Déterminer les relations de cause à effet entre les phénomènes est une tâche quotidienne des scientifiques. Elle s'appuie souvent sur la mise au jour de liens statistiques, ou corrélations.
- La déduction de liens de causalité à partir de corrélations fait l'objet de théories fondées sur l'idée qu'un effet est davantage probable en présence d'une de ses causes qu'en son absence.
- Des algorithmes inspirés de ces théories sont utilisés dans les sciences empiriques.

© Bruno Vacaro d'après T. Messerli, The New England Journal of Medicine, vol. 367, no 16, 18 octobre 2012, p. 1562-1564

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

exemple simple qui nous suivra tout au long de cet article.

Baptiste Coulmont, sociologue à l'Université Paris 8, tient un blog où, en particulier, il présente des statistiques sur les résultats aux épreuves du baccalauréat et les prénoms des candidats. On peut notamment y apprendre qu'en 2012, parmi les candidates au baccalauréat général ou technologique ayant obtenu une note d'au moins 8 sur 20 et ayant autorisé la publication de leur résultat sur Internet, plus d'un quart de celles prénommées Irène ont obtenu la mention « Très bien » – alors que, par exemple, ce fut le cas de moins de un pour cent des Alison. Ici, le prénom Irène et l'obtention de la mention « Très bien » sont « corrélés positivement », expression qui traduit le fait qu'il est plus probable d'obtenir cette mention en se prénommant Irène qu'en portant un autre prénom.

Faut-il en conclure que le prénom Irène est doté de propriétés spéciales, en vertu desquelles celles qui le portent obtiennent plus facilement la mention « Très bien » au baccalauréat ? Cette corrélation n'est-elle pas plutôt une conséquence de ce que les parents qui choisissent de prénommer leur fille Irène ont un capital culturel supérieur à la moyenne, donc une probabilité supérieure de voir leur enfant obtenir la mention « Très bien » au baccalauréat ? Ou y a-t-il un peu des deux, ou d'autres facteurs encore, dans la réussite des Irène ?

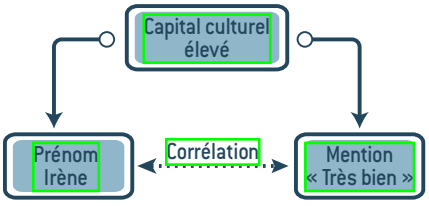
1. LA CONSOMMATION MOYENNE de chocolat par habitant est corrélée au nombre de lauréats du prix Nobel, d'après une étude de l'Américain Franz Messerli publiée en 2012 : en général, plus un pays présente une consommation élevée, plus nombreux sont ses ressortissants nobélisés. Mais on ne peut pas conclure qu'une consommation accrue de chocolat a pour effet d'augmenter le nombre de lauréats du prix Nobel. Il est même vraisemblable que la corrélation soit trompeuse : la richesse du pays pourrait être le facteur commun aux deux propriétés considérées, sans que ces propriétés soient causalement liées entre elles.

Ces questions reviennent à se demander quelle histoire causale se cache derrière la corrélation observée entre la mention et le prénom, c'est-à-dire quels sont les liens de cause à effet sous-jacents à la situation. Plus généralement, la question est : à quelles conditions des corrélations permettent-elles de tirer des conclusions causales, par exemple de conclure que le prénom Irène est la cause de la mention « Très bien » ?

Ce problème se pose quotidiennement dans tous les domaines de la science où l'on est confronté à des ensembles de données empiriques nécessitant une explication : économie, épidémiologie, toxicologie, astronomie, etc. L'interprétation correcte des corrélations observées en termes d'éventuels liens de causalité sous-jacents constitue l'un des pivots de la démarche scientifique. Elle est à ce titre d'une grande importance théorique.

Elle a aussi une grande importance pratique. C'est notamment le cas dans le domaine de la santé publique. Ainsi, quand on constate une forte corrélation entre l'exposition à une certaine substance de synthèse et une pathologie grave, il faut être sûr que cette corrélation résulte d'un lien de causalité avant que les pouvoirs publics décident d'une mesure telle que l'interdiction de la commercialisation de la substance en question. Par exemple, la corrélation pourrait être due au fait que les personnes exposées à cette substance sont aussi systématiquement exposées à un autre produit, la pathologie étant causée par ce dernier et non par la substance suspectée initialement.

Pour passer des corrélations observées aux relations causales, deux étapes sont à franchir. La première consiste à passer des corrélations observées sur un échantillon d'une population à celles en vigueur dans la population entière. Cette première étape, la généralisation d'un échantillon de population à la population entière, relève de la science statistique. La seconde étape consiste, pour la population considérée, à passer des corrélations aux liens de cause à effet. Seule cette seconde étape concerne spécifiquement la causalité, et c'est sur elle que portera notre propos.



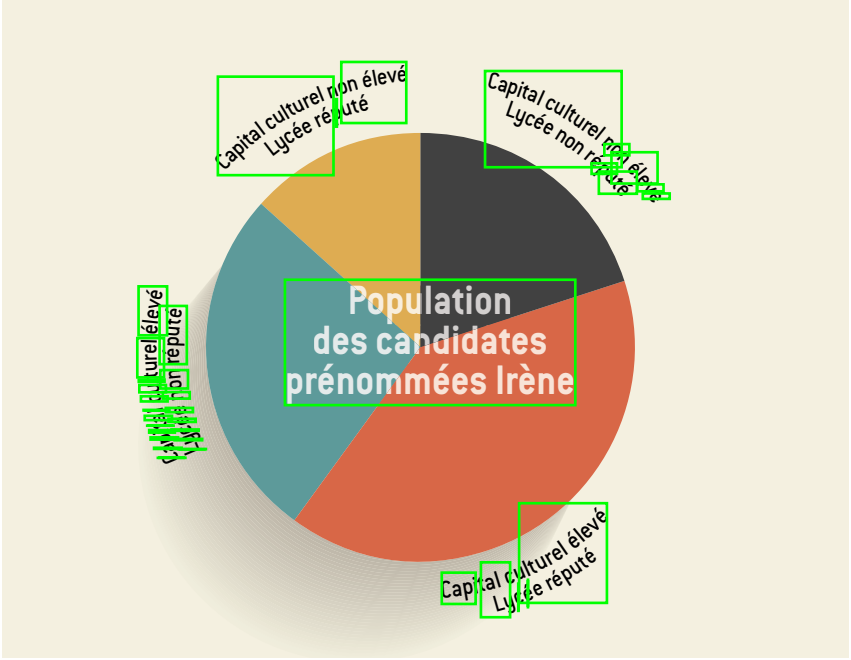
2. CHEZ LES CANDIDATES au baccalauréat, le prénom Irène est corrélé à la mention « Très bien ». Mais l'existence d'un lien de cause à effet entre le prénom et la mention au baccalauréat est peu vraisemblable. La corrélation observée serait plutôt une conséquence de ce que les parents qui choisissent de prénommer leur fille Irène ont un capital culturel supérieur à la moyenne, d'où une probabilité supérieure pour leur enfant d'obtenir une bonne mention au baccalauréat.

Diverses approches

La question de la causalité est réapparue en philosophie des sciences dans la seconde moitié du XX^{e} siècle. L'une des lignes d'analyse explorées visait à définir la causalité par le concept de corrélation – ou de dépendance probabiliste, selon les termes en usage chez les philosophes.

Cette façon de définir la causalité n'est pas la seule. L'une des principales définitions concurrentes repose sur l'idée que les effets n'auraient pas lieu si leurs causes n'avaient pas lieu ; cette approche peut s'appliquer à certaines études historiques par exemple. Une autre proposition, formulée dans le cadre des théorisations de la démarche expérimentale, se fonde sur la possibilité de manipuler les effets en intervenant sur les causes. Une troisième approche, enfin, est axée sur la caractérisation physique des relations causales, c'est-à-dire sur l'identification des grandeurs physiques dont la transmission de proche en proche constitue la relation de causalité.

Toutefois, l'analyse de la causalité en termes de corrélations est sans doute celle à laquelle les scientifiques font le plus appel, au moins explicitement, et c'est celle qui nous concerne ici. Cette approche repose sur l'idée qu'un effet est plus probable en présence de l'une de ses causes qu'en son absence. Ainsi, il est plus probable pour un candidat d'obtenir la mention « Très bien » s'il a un capital culturel élevé que sinon. En utilisant la notion de probabilité



3. LE PRÉNOM IRÈNE serait la cause de la mention « Très bien » si et seulement si ce prénom rendait cette mention plus probable dans chacune des sous-populations définies par les autres causes possibles de la mention. Dans l'exemple ici représenté, quatre sous-populations sont définies par le lycée fréquenté (réputé ou non) et par le capital culturel (élevé ou non).

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

conditionnelle *(voir l'encadré ci-contre)*, le fait qu'un effet E soit plus probable en présence de l'une de ses causes C qu'en son absence s'écrit :

$p(E \mid C) > p(E \mid \text{non-}C)$.

Cette inégalité, que nous noterons (A), se lit : la probabilité de E sachant que C est réalisé est supérieure à la probabilité de E sachant que C n'est pas réalisé. On peut montrer qu'elle est équivalente à l'inégalité $p(E \mid C) > p(E)$ (la probabilité de E sachant que C est réalisé est supérieure à la probabilité de E en général).

Cependant, l'inégalité (A) ne suffit pas à caractériser les relations de cause à effet. Pour le comprendre, revenons à notre exemple initial, où il est plus probable d'obtenir une mention « Très bien » en se prénommant Irène qu'autrement. Une première difficulté est que la corrélation positive est symétrique et ne rend donc pas compte de la direction du lien de cause à effet : les lois du calcul des probabilités montrent que si C (prénom Irène) augmente la probabilité de E (mention « Très bien »), alors E augmente la probabilité de l'événement C *(voir l'encadré ci-contre)*. En d'autres termes, la corrélation exprimée par (A) ne permet pas de savoir si C est la cause de E ou si, au contraire, c'est E qui entraîne C.

Des corrélations sans liens de causalité

Une seconde difficulté, déjà indiquée, est que la corrélation positive du prénom Irène avec la mention « Très bien » pourrait ne pas indiquer un rapport de causalité entre prénom et mention, mais cacher une structure causale plus complexe, impliquant par exemple le capital culturel de la personne nommée Irène. Selon cette hypothèse, un capital culturel élevé favoriserait à la fois le choix du prénom Irène et l'obtention d'une mention « Très bien », d'où la corrélation positive entre ces deux événements *(voir la figure 2)*.

C'est là un fait général : quand une cause C a deux effets E_1 et E_2, l'occurrence de E_1 (ou de E_2) augmente la probabilité de E_2 (ou de E_1), même si E_1 ne cause pas E_2 (ou inversement). En d'autres termes, pas plus qu'elle ne rend compte de la direction de la causalité, l'inégalité (A) ne permet de distinguer entre un lien de causalité (C est la cause de E) et un lien entre deux effets d'une même cause (C et E sont tous deux causés par un certain facteur F).

Probabilité conditionnelle et symétrie cause-effet

En l'absence d'informations particulières, notons *p*(A) la probabilité d'un événement A. La probabilité de A verra sa valeur modifiée si l'on sait qu'un événement B, qui peut être lié à A, s'est produit.

La probabilité de A sachant que B s'est produit, notée $p(A \mid B)$, est alors égale à $p(A \text{ et } B)/p(B)$, où $p(A \text{ et } B)$ désigne la probabilité qu'à la fois A et B soient réalisés. Dans l'exemple d'un lancer de dé, si A est l'événement « Le dé affiche le nombre 3 ou 6 » et B l'événement « Le dé affiche un nombre pair », l'événement (A et B) est « Le dé affiche le nombre 6 » et la probabilité que le dé affiche 3 ou 6 sachant qu'un nombre pair a été obtenu est égale à $p(A \mid B) = (1/6)/(1/2) = 1/3$.

À partir de la définition ci-dessus, quelques manipulations algébriques simples montrent que l'inégalité $p(E \mid C) > p(E)$, qui traduit le fait que la réalisation d'une cause C augmente la probabilité de l'effet E, est équivalente à l'inégalité $p(C \mid E) > p(C)$, c'est-à-dire que la réalisation de E augmente la probabilité de C. Les rôles de C et E sont ainsi échangés, et il en résulte que l'inégalité $p(E \mid C) > p(E)$ ne permet pas de distinguer le sens de la relation de causalité entre E et C.

Comment, alors, s'appuyer sur l'inégalité (A) pour développer une théorie adéquate de la causalité ? Une première stratégie a été poursuivie par l'Américain Patrick Suppes et exposée dans un ouvrage paru en 1970. L'idée consiste à caractériser, par des propriétés probabilistes, les situations donnant lieu à des corrélations positives auxquelles ne correspond pas une relation de cause à effet. On dira alors que C cause E si et seulement si C et E vérifient l'inégalité (A), mais pas les propriétés probabilistes en question. Cette stratégie a pu être développée grâce au travail du philosophe d'origine allemande Hans Reichenbach, qui avait donné en 1956 une caractérisation probabiliste des structures causales comprenant une cause et deux effets, dont aucun n'entraîne l'autre *(voir l'encadré page 58)*.

Cependant, la première difficulté indiquée ci-dessus, à savoir le caractère symétrique de la corrélation positive, est beaucoup plus difficile à résoudre : il n'est pas aisé de déterminer la direction de la causalité au moyen de concepts probabilistes. Aussi P. Suppes proposa-t-il de la faire découler de la direction du temps. D'après ce philosophe, C est une cause de E si les trois conditions suivantes sont réunies : C et E vérifient l'inégalité (A) ; C et E ne vérifient pas les relations probabilistes entre effets d'une cause commune dont aucun ne cause l'autre ; C est antérieur à E.

La proposition de P. Suppes présente plusieurs défauts. Au plan conceptuel, faire découler la direction de la causalité

L'AUTEUR

Isabelle DROUET est maître de conférences à l'Université Paris-Sorbonne, où elle enseigne la philosophie des sciences et la logique.

de celle du temps interdit une construction inverse, consistant à fonder la direction du temps sur celle de la causalité – idée que certains philosophes trouvent séduisante. Et au plan méthodologique, la proposition de P. Suppes n'est guère éclairante : autant les informations probabilistes sont souvent plus faciles à obtenir que les informations causales, autant ce n'est pas toujours le cas des informations temporelles. Par exemple, il semble clair que le prénom est antérieur à la mention au baccalauréat ; mais quand on cherche à relier un taux de chômage élevé avec une croissance économique faible, laquelle des deux propriétés est antérieure à l'autre ?

Dans une seconde famille de théories probabilistes de la causalité, on cherche plutôt à préciser l'idée selon laquelle les causes rendent leurs effets plus probables. Être une cause de E, c'est rendre E plus probable dans les différentes sous-populations définies par les autres variables pertinentes. Autrement dit, le prénom Irène est la cause de l'obtention d'une mention « Très bien » si et seulement si « Irène » rend cette mention plus probable une fois que toutes les autres informations pertinentes ont été prises en compte. Supposons pour simplifier que le capital culturel des parents soit la seule information de ce type (ce n'est en réalité pas le cas) ; cela signifie que « Irène » serait la cause de la mention « Très bien » si et seulement si ce prénom rendait plus probable cette mention à la fois dans la sous-population des candidates culturellement favorisées et dans celle des autres candidates.

Est-il possible de caractériser de façon générale de telles sous-populations ? Le capital culturel a un effet causal sur la mention au baccalauréat, et le prendre en compte suffit ici à garantir l'analyse en termes de corrélation positive parce que nous avons supposé que, le prénom mis à part, il constitue la seule information pertinente. Autrement dit, nous avons supposé que, le prénom mis à part, le capital culturel est la seule autre cause possible de la mention. Et nous avons distingué seulement deux sous-populations homogènes vis-à-vis du capital culturel, celle des candidates culturellement favorisées et celle des candidates qui ne le sont pas. L'analyse pourrait être améliorée en décomposant plus finement la population en fonction du capital culturel : « Irène » causerait la mention « Très bien » si et seulement si ce prénom rendait la mention « Très bien » plus probable dans toutes les sous-populations définies par les différentes valeurs du capital culturel.

Admettons maintenant qu'il existe une deuxième cause possible de ce type, par exemple la fréquentation d'un lycée réputé. Il faut alors distinguer au moins quatre sous-populations, caractérisées par les propriétés suivantes : capital culturel élevé et lycée réputé ; capital culturel élevé et lycée non réputé ; capital culturel non élevé et lycée réputé ; capital culturel non élevé et lycée non réputé. « Irène » serait la cause de la mention « Très bien » si et seulement si ce prénom rendait la mention « Très bien » plus probable dans chacune de ces quatre sous-populations *(voir la figure 3)*.

De façon générale, selon cette ligne d'analyse, C cause E si et seulement si C rend E plus probable dans toutes les sous-populations que permettent de définir les causes possibles de E autres que C (et, pour être précis, non causées par C). Cette idée a été introduite en 1979 par la philosophe britannique et américaine Nancy Cartwright. Puisque les sous-populations définies par les causes de E autres que C ne sont pas identiques aux sous-populations définies par les causes de C autres que E, cette analyse n'est pas symétrique. Cette démarche a été précisée dans les années 1980, en particulier par N. Cartwright elle-même. Elle a abouti à une analyse de la causalité que les philosophes considèrent comme satisfaisante.

L'IDÉE INTRODUITE EN 1979
par Nancy Cartwright a conduit à une analyse de la causalité que les philosophes considèrent comme satisfaisante.

Toutefois, même si elle constitue un progrès conceptuel, cette analyse de la causalité a ses limites. En effet, il est impossible de transposer directement les théories probabilistes de la causalité au domaine de la méthodologie scientifique : les scientifiques ne peuvent pas les utiliser comme seul guide pour identifier des relations causales à partir des corrélations qu'ils observent dans la nature ou dans leurs expériences. Pourquoi ?

D'abord, ces théories sont circulaires et, en conséquence, il est impossible de même commencer à mener la tâche visant à déterminer si C cause E. En effet, pour déterminer si C cause E, il faudrait selon ces théories déterminer si C augmente la probabilité de E dans toutes les sous-populations définies par les causes de E autres que C. Pour déterminer si C cause E, il faut donc connaître toutes les autres causes de E : en d'autres termes, il faut connaître les causes de E pour déterminer quelles sont les causes de E ! Ainsi, les théories probabilistes de la causalité ne permettent pas à elles seules de commencer à acquérir des connaissances causales.

Ensuite, les théories probabilistes ne définissent pas de principe de clôture *a priori* qui viendrait délimiter l'ensemble des

Corrélations sans lien de causalité

En 1956, le philosophe d'origine allemande Hans Reichenbach a caractérisé en termes probabilistes des situations où une cause C a deux effets E et E', ces deux effets n'étant pas liés par causalité (E n'entraîne pas E', et E' n'entraîne pas E).

Cette caractérisation est la suivante :

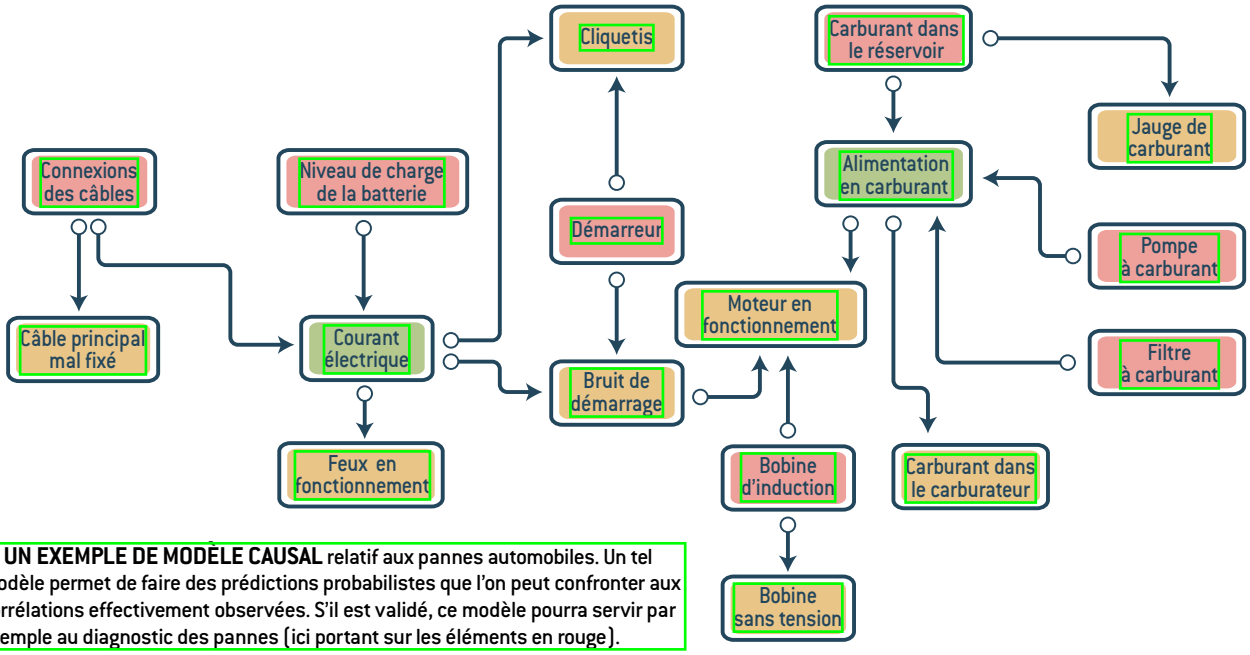
1. $p(E \mid E') > p(E \mid \text{non-}E')$
2. $p(E \mid C) > p(E \mid \text{non-}C)$
3. $p(E' \mid C) > p(E' \mid \text{non-}C)$
4. $p(E \mid E' \text{ et } C) = p(E \mid C)$
5. $p(E \mid E' \text{ et non-}C) = p(E \mid \text{non-}C)$.

Selon la clause (1), E et E' sont positivement corrélés.

Les clauses (2) et (3) indiquent qu'il en va de même de E et C d'une part, et E' et C d'autre part. Jusque-là, il n'y a pas de différence entre E, E' et C.

Mais les clauses (4) et (5) isolent une propriété spécifique à C, qui traduit en termes probabilistes son statut causal particulier dans le système liant les trois propriétés C, E et E'. Selon (4), E et E' ne sont pas corrélés dans la sous-population des individus qui ont la propriété C ; selon (5), ils ne le sont pas non plus dans la sous-population des individus qui n'ont pas la propriété C. Autrement dit, une fois qu'on sait si C est le cas ou non, E' ne nous apprend plus rien à propos de E. Pour décrire cette situation, on dit souvent que C fait écran entre E et E'.

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014



4. UN EXEMPLE DE MODÈLE CAUSAL relatif aux pannes automobiles. Un tel modèle permet de faire des prédictions probabilistes que l'on peut confronter aux corrélations effectivement observées. S'il est validé, ce modèle pourra servir par exemple au diagnostic des pannes (ici portant sur les éléments en rouge).

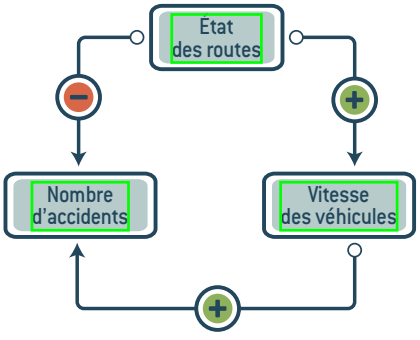
causes possibles d'un effet donné. Elles ne permettent donc jamais de savoir si l'on a identifié toutes les causes d'un effet E, ni par conséquent de savoir si l'on a identifié toutes les causes de E autres que C, ni donc d'établir que C cause E.

En dépit de ces deux obstacles, il existe aujourd'hui au moins trois types de méthodes pour tirer des conclusions causales à partir de corrélations. Comment est-ce possible ?

Une des méthodes : les essais randomisés

Le premier type de méthodes repose sur l'analyse suivante : ce que la circularité et l'absence de principe de clôture interdisent précisément, c'est de tirer des conclusions causales à partir des probabilités dans des contextes où toutes les causes sont présentes en même temps, où personne n'agit sur elles et où le facteur C, dont on cherche à déterminer s'il est une cause de E, a le même statut que les autres causes de E. Or l'expérimentation permet d'éviter cela : la première stratégie consiste ainsi à intervenir sur le système étudié et à s'intéresser non pas à la probabilité de l'effet E quand sa cause supposée C est observée, mais à sa probabilité quand l'expérimentateur impose C.

C'est exactement ce qui se passe dans un essai clinique randomisé, où l'on administre à chaque participant soit le traitement étudié, soit un placebo, selon le résultat d'un tirage au sort. Les probabilités de guérison après une telle intervention permettent de déterminer si le traitement cause la guérison.



5. UNE RELATION DE CAUSALITÉ ne se traduit pas forcément par une corrélation. Ainsi, il existe un lien causal entre l'état des routes et le nombre d'accidents, mais il est possible que la corrélation n'apparaisse pas. Toutes choses égales par ailleurs, un meilleur état des routes réduit le nombre d'accidents ; mais les conducteurs tendent à rouler plus vite si la route est meilleure, ce qui accroît la probabilité d'accidents. Les deux effets peuvent se compenser, auquel cas il n'y aurait pas de corrélation.

Plus précisément, admettons que le tirage au sort garantisse que les différentes sous-populations à considérer soient représentées de façon égale dans les deux groupes ; une probabilité supérieure de guérison dans le groupe ayant reçu le traitement implique que la probabilité de guérison est supérieure dans au moins une de ces situations, et donc que le traitement cause la guérison au sens des théories probabilistes *(voir l'encadré page 60)*. Ce résultat vaut même si l'on n'a pas identifié les causes de guérison autres que le traitement. Il n'est donc pas nécessaire d'identifier toutes les causes de E différentes de C en vue de déterminer si C cause E. Les deux obstacles que nous avons mis au jour, circularité et absence de principe de clôture, sont ainsi contournés.

Une deuxième stratégie émane d'une analyse un peu différente : les obstacles cités plus haut interdisent de tirer des conclusions causales à partir des seules corrélations, et en l'absence de connaissances causales préalables. En ce sens, ils interdisent d'induire des conclusions causales. Mais l'induction n'est pas le seul mode de raisonnement disponible : les méthodes du second type

Figure d'après A. M. Przyluski et al., IEEE-AC paper 1187, 2002

ont un caractère hypothético-déductif. Qu'est-ce que cela signifie ?

Pour déterminer si le prénom Irène cause la mention « Très bien », un raisonnement hypothético-déductif débuterait par la formulation d'une hypothèse sur les causes de la mention (lesquelles pourraient inclure le capital culturel des parents, la réputation de l'établissement fréquenté, l'âge du candidat, etc.) et sur les relations causales qu'elles entretiennent avec le prénom. Généralement, on nomme « modèle causal » une telle hypothèse, que l'on représente par un graphe : les nœuds de ce graphe correspondent aux phénomènes pris en compte (le prénom, la mention, les causes de la mention…) et les flèches d'un nœud à l'autre représentent des relations de cause à effet *(voir la figure 4)*.

En utilisant les théories probabilistes de la causalité, on tire des conclusions probabilistes d'un tel modèle. Si ces conclusions contredisent les observations, le modèle est rejeté ; si elles sont valides, il peut être considéré comme confirmé. Ici, le problème de la circularité et celui de l'absence de principe de clôture sont résolus dès lors que l'on définit un modèle causal. D'une part, en effet, tout modèle causal porte sur un certain nombre de phénomènes bien déterminés et, de ce fait, il véhicule une réponse à la question de la clôture laissée ouverte par les théories probabilistes. D'autre part, pour chacun des phénomènes qu'il représente, le modèle formule une hypothèse relativement à l'ensemble de ses causes. La circularité des théories probabilistes n'intervient donc plus.

Reste que l'expérimentation et l'hypothético-déduction ont chacune des limites. Un essai randomisé n'est que rarement envisageable – par exemple, il ne l'est pas dans le cas du prénom et de la mention. De même, le succès des approches hypothético-déductives dépend largement des hypothèses qui auront pu être formulées.

Toutefois, des algorithmes développés depuis les années 1990 par les équipes de Judea Pearl, à l'Université de Californie à Los Angeles, et de Clark Glymour, Peter Spirtes et Richard Scheines, à l'Université Carnegie Mellon de Pittsburgh, visent à contourner les obstacles que nous avons mis en évidence d'une façon qui soit à la fois observationnelle et inductive.

Des algorithmes utiles

Ces algorithmes prennent pour entrée les corrélations entre phénomènes d'un ensemble préalablement fixé. Le problème constitué par l'absence de principe de clôture est donc résolu exactement de la même façon que dans le cadre hypothético-déductif : en isolant d'emblée un ensemble fini de phénomènes. Mais ici, aucune hypothèse causale n'est formulée. À partir des seules corrélations – les informations en termes de probabilités –, on construit tous les graphes susceptibles d'être le modèle causal correct pour l'ensemble de phénomènes considéré. L'obstacle de la circularité des théories probabilistes de la causalité est donc contourné.

Ces algorithmes font appel à une analyse un peu différente (et un peu moins satisfaisante) de celle qu'utilisent les théories probabilistes circulaires, avec la conséquence importante que des informations purement probabilistes suffisent à déterminer si deux phénomènes de l'ensemble considéré ont un lien de causalité direct, sans l'intermédiaire d'un autre phénomène.

Cependant, l'analyse qui fonde ces algorithmes admet des contre-exemples, qui ont fait l'objet d'un vif débat dans les années 2000. Notamment, elle suppose

LES ESSAIS CLINIQUES RANDOMISÉS

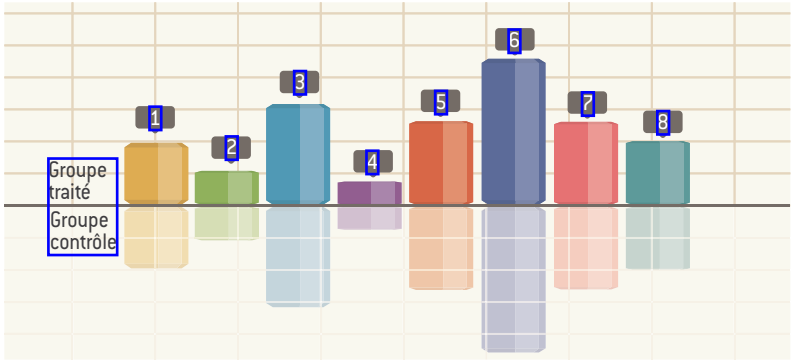
Le premier essai clinique randomisé ayant donné lieu à une publication scientifique a été mené en Grande-Bretagne dans les années 1940*. L'étude portait sur l'effet d'un antibiotique, la streptomycine, sur la tuberculose pulmonaire.

Cent neuf patients, âgés de 15 à 25 ans, y ont participé. Ils ont été répartis en deux groupes, l'un recevant le traitement, l'autre non (le « groupe contrôle »). La répartition a été effectuée selon une procédure aléatoire garantissant que deux patients du même sexe et relevant du même hôpital aient la même probabilité d'appartenir au groupe recevant la streptomycine.

Cette façon de procéder vise à répartir de manière similaire dans les deux groupes les autres facteurs que la streptomycine, le sexe et l'hôpital de prise en charge susceptibles d'affecter causalement l'évolution de l'état de santé des patients.

Imaginons que, dans le cas considéré, il existe trois facteurs de ce type : l'âge, le régime alimentaire et le niveau culturel. Si chacun de ces facteurs est susceptible de deux modalités, huit situations peuvent se présenter. La randomisation (le choix aléatoire des patients à traiter parmi les participants à l'essai clinique) vise à faire en sorte que ces huit situations soient représentées de manière comparable dans le groupe traité et dans le groupe contrôle *(voir la figure)*. Cette procédure est désormais la règle dans les essais cliniques rigoureux, qui doivent par ailleurs porter sur un nombre suffisant de patients pour que la randomisation soit efficace.

*G. Marshall *et al.*, *British Medical Journal*, vol. 2(4582), pp. 769-782, 1948.



EN SUPPOSANT QUE L'ÂGE, le régime alimentaire et le niveau culturel puissent influer sur l'évolution de l'état de santé, et que chacun de ces facteurs ait deux valeurs pertinentes seulement, l'ensemble des patients constitue huit sous-populations. Grâce à la randomisation, les individus de chaque sous-population sont à peu près également répartis entre le groupe traité et le groupe contrôle.

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

que la relation de cause à effet n'est jamais symétrique, là où nous aurions envie de dire que, par exemple, un système immunitaire déprimé est à la fois cause de la maladie et causé par celle-ci.

Un autre défaut est qu'elle suppose aussi que les relations causales directes se traduisent toujours dans les probabilités, ce qui n'est pas le cas. Par exemple, un meilleur état des routes à la fois cause directement une diminution des accidents et indirectement leur augmentation, en entraînant une augmentation de la vitesse, et il est possible que ces deux effets se compensent exactement *(voir la figure 5)*. Dans ce cas, l'état des routes n'est pas corrélé au nombre d'accidents, alors qu'il existe des relations de causalité. Or les algorithmes en question concluraient à l'absence d'effet causal direct de l'état des routes sur le nombre d'accidents.

La conception de la causalité véhiculée par ces algorithmes n'est donc pas complètement satisfaisante. En outre, le diagramme produit par ces algorithmes est souvent ambigu : il représente plusieurs graphes causaux entre lesquels les algorithmes ne tranchent pas. Mais les contre-exemples restent exceptionnels, en particulier si l'ensemble de phénomènes considérés est soigneusement défini, et l'ambiguïté ne nuit pas à la correction. Ces algorithmes peuvent donc être utilisés en sciences et ils le sont, principalement à titre exploratoire et dans des contextes où beaucoup de données, mais peu de théories, sont disponibles. Cela a par exemple été le cas dans une étude publiée en 2004 sur les causes de la mortalité infantile aux États-Unis.

En somme, les réflexions philosophiques n'ont pas seulement permis de caractériser la causalité en termes de corrélations. Elles nous permettent aussi de comprendre pourquoi il est difficile d'identifier les relations de cause à effet sur la base de prémisses probabilistes et de faire apparaître les différentes méthodes qui existent pourtant comme mettant en œuvre des stratégies de contournement différentes. Les arbitrages qui sous-tendent le choix de l'une de ces méthodes en pratique sont ainsi clarifiés. ■

BIBLIOGRAPHIE

I. Drouet, **Causes, probabilités, inférences**, Vuibert, 2012.

C. Hitchcock, **Probabilistic causation**, dans *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Winter 2012 Edition), E. N. Zalta (ed.), disponible sur : http://plato.stanford.edu/archives/win2012/entries/causation-probabilistic/

N. Cartwright, **Are RCTs the gold standard ?**, *BioSocieties*, vol. 2, pp. 11-20, 2007.

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

Le réchauffement global s'est temporairement ralenti, mais une crise climatique menace toujours dans un avenir proche.

Michael Mann

CLIMAT le faux espoir

« Les températures sont constantes depuis 15 ans – et personne ne peut l'expliquer. »
Wall Street Journal

« La "pause" du réchauffement climatique pourrait durer encore 20 ans et la glace de la mer Arctique a déjà commencé à se reformer. »
Daily Mail

Les médias populaires abondent de telles déclarations rassurantes sur le climat, mais ils se fourvoient. Le réchauffement climatique se poursuit et demeure un problème urgent.

D'où vient ce malentendu ? La température moyenne à la surface de la Terre a augmenté moins vite durant la dernière décennie qu'au cours de la décennie précédente. On parle communément d'une « pause », mais ce terme est trompeur, car la température a continué de croître ; il s'agit plutôt d'un ralentissement. Que présage ce ralentissement sur le réchauffement futur ?

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) est chargé de répondre aux questions de ce type. Ses prévisions sont publiées tous les cinq ou sept ans. Dans son rapport de 2013 – le cinquième rapport majeur –, il a légèrement abaissé la valeur minimale du réchauffement par rapport à la version de 2007, afin de prendre en compte le ralentissement de la dernière décennie. Les travaux du GIEC font référence et orientent les politiques climatiques dans le monde, de sorte que ce petit changement a suscité le débat sur la rapidité du réchauffement et sur le temps dont nous disposons pour l'arrêter.

J'ai mené plusieurs calculs pour apporter quelques éléments de réponse. Selon ces calculs, si nous continuons à brûler des carburants fossiles au rythme actuel, la température franchira une limite correspondant à une catastrophe environnementale en 2036. La prétendue pause peut repousser cette échéance de quelques années, mais pas plus.

Un réchauffement inédit depuis plus de 1 000 ans

En 2001, le GIEC a publié une courbe que j'ai élaborée avec d'autres chercheurs, et qui a acquis une notoriété mondiale sous le nom de « crosse de hockey ». Elle représente l'évolution de la température dans l'hémisphère Nord au cours des 1 000 dernières années – aussi loin que nos données remontaient à l'époque. Cette courbe montre que pendant cette période, la température a peu changé jusqu'au milieu du XIX^{e} siècle (partie correspondant au manche de la crosse) et a

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

© Shutterstock.com/Antonov Roman

brusquement augmenté un peu plus tard (la lame de la crosse).

Cette courbe a été très utilisée dans le débat sur le changement climatique. Dans son rapport de septembre 2013, le GIEC est remonté encore plus loin dans le temps et a conclu que le réchauffement récent est sans précédent depuis au moins 1 400 ans.

L'ampleur du réchauffement à venir dépend de la sensibilité de la température aux émissions anthropiques (c'est-à-dire dues aux activités humaines) de gaz à effet de serre, principalement du dioxyde de carbone. Les chercheurs la quantifient par une valeur standard nommée sensibilité climatique à l'équilibre (*Equilibrium climate sensitivity*, ou ECS) : cette valeur représente le réchauffement prévu à la surface de la Terre à la suite d'un doublement de la concentration de dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère (considéré ici par rapport aux niveaux pré-industriels), en supposant que le climat s'est stabilisé ensuite.

La concentration atmosphérique de CO_2 à l'ère pré-industrielle étant d'environ 280 parties par million (ppm), le double vaut à peu près 560 ppm. On s'attend à ce que cette valeur soit atteinte au cours de ce siècle si l'on continue à brûler des carburants fossiles au rythme actuel – un scénario qualifié de *business-as-usual* (« les affaires continuent comme d'habitude »). Plus la température atmosphérique est sensible à une augmentation de CO_2 (plus l'ECS est important), plus vite elle s'élèvera.

Des rétroactions qui compliquent l'analyse

La valeur de la sensibilité climatique à l'équilibre est difficile à déterminer, car le réchauffement est influencé par des mécanismes de rétroaction, qui impliquent par exemple les nuages ou la glace. Les résultats des diverses simulations diffèrent quant à leurs effets précis, en particulier pour la couverture nuageuse. Celle-ci a à la fois un effet refroidissant, en réfléchissant vers l'espace la lumière du soleil, et un effet réchauffant, en absorbant une partie de l'énergie thermique émise par la Terre. Lequel domine ? Cela dépend du type, de la répartition et de l'altitude des nuages – difficilement prévisibles par les modèles climatiques. D'autres facteurs susceptibles d'exercer une rétroaction sont les variations de la quantité de vapeur d'eau (un gaz à effet de serre) dans l'atmosphère et la fonte des glaces océaniques et continentales (la glace renvoie plus d'énergie solaire vers l'espace que l'eau libre ou le sol).

Ces rétroactions présentent plusieurs incertitudes : quelle quantité de vapeur d'eau stockera une atmosphère plus chaude ? À quelle vitesse fondront les glaces ? De ce fait, le GIEC fournit une fourchette de valeurs pour la sensibilité climatique à l'équilibre, et non un seul nombre. Selon le rapport de septembre 2013, le réchauffement serait ainsi compris entre 1,5 et 4,5 °C pour un doublement de la quantité de CO_2 atmosphérique. La valeur inférieure a été abaissée par rapport au quatrième rapport, publié en 2007, qui l'estimait à 2 °C. Cette modification ne repose que sur un élément, peu fiable : le ralentissement du réchauffement lors de la dernière décennie – la pseudo-pause.

Pour nombre d'experts du climat – y compris moi-même –, une seule décennie

L'ESSENTIEL

- L'augmentation de température à la surface de la Terre a un peu ralenti durant la dernière décennie. Mais le terme de « pause », souvent employé, est inapproprié.
- De nouveaux calculs montrent que si nous continuons à brûler des carburants fossiles au rythme actuel, le réchauffement global atteindra 2 °C en 2036, un niveau jugé dangereux.
- Afin que cette limite ne soit pas franchie, la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone devra rester inférieure à 405 parties par million.

est une période trop brève pour mesurer de façon précise le réchauffement global et le GIEC a accordé trop d'importance à ce phénomène. En outre, d'autres facteurs ont été proposés pour l'expliquer ; ils ne font pas intervenir la sensibilité du climat aux gaz à effet de serre et n'impliquent pas une poursuite du ralentissement.

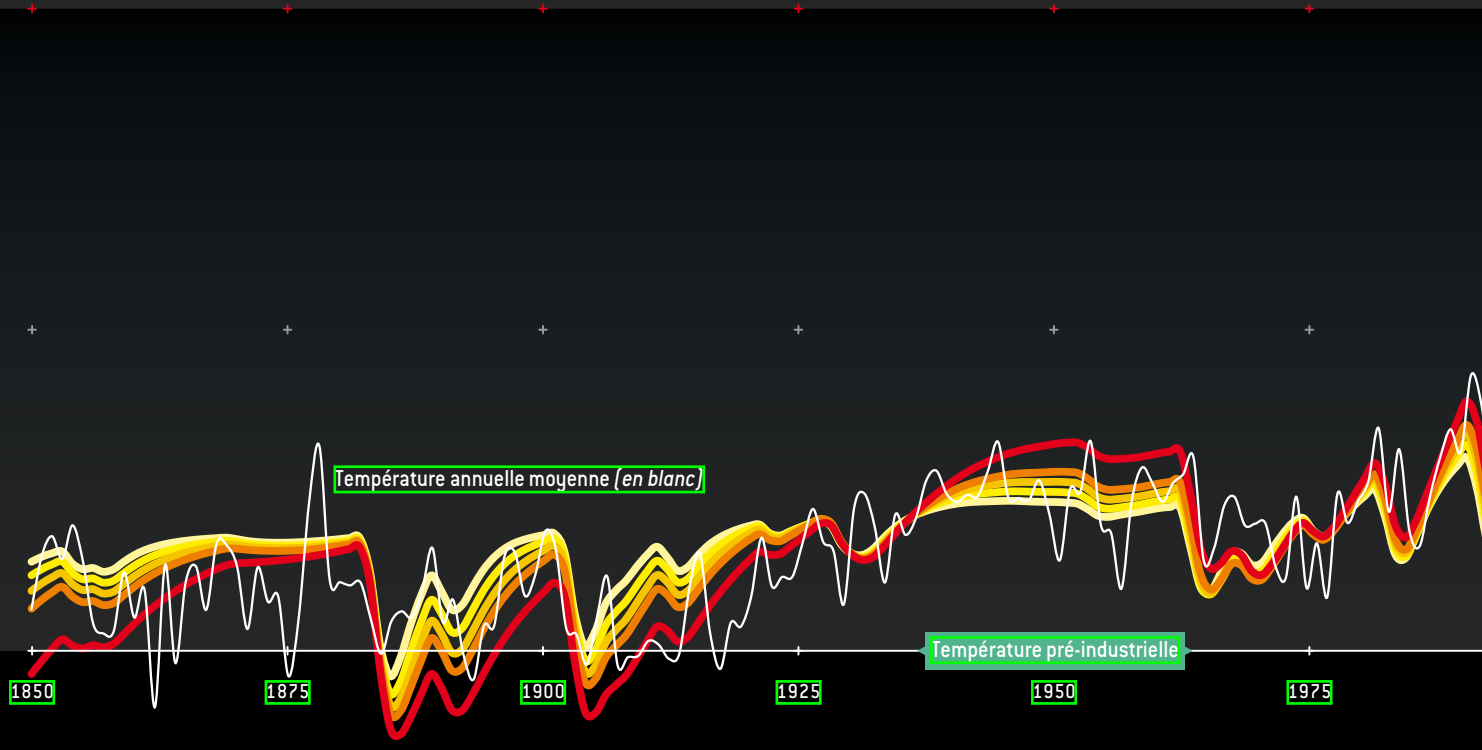
L'un de ces facteurs est par exemple l'impact cumulé des éruptions volcaniques de la dernière décennie, dont celle du volcan islandais Eyjafjallajökull : l'effet refroidissant des particules projetées dans l'atmosphère pourrait avoir été plus important que ne le prévoyaient la plupart des modèles climatiques. Un autre facteur est l'activité solaire, qui a connu une légère baisse et qui n'a pas été prise en compte dans les simulations du GIEC. La variabilité naturelle de la quantité de chaleur absorbée par les océans pourrait aussi avoir joué un rôle. Durant la dernière moitié de la décennie, La Niña (un phénomène climatique périodique, qui se traduit notamment par un refroidissement des eaux de surface à l'Est de l'océan Pacifique) s'est prolongée dans une partie du Pacifique, au niveau des tropiques. Ce phénomène aurait provoqué une baisse globale de 0,1 °C des températures de surface – un effet mineur par rapport au réchauffement à long terme, mais notable sur une décennie. Enfin, une étude récente suggère qu'un échantillonnage incomplet des températures arctiques a conduit à sous-estimer le réchauffement du globe.

Aucune de ces explications n'implique que le climat est moins sensible aux gaz à effet de serre. D'autres mesures suggèrent que la valeur de 1,5 °C, choisie comme limite inférieure de la sensibilité climatique, est peu probable. Les éléments disponibles plaident plutôt en faveur d'une valeur proche de 3 °C. Quand on fait la moyenne des valeurs trouvées par les modèles climatiques utilisés pour le cinquième rapport du GIEC, on trouve d'ailleurs un réchauffement de 3,2 °C pour un doublement de la quantité de gaz à effet de serre.

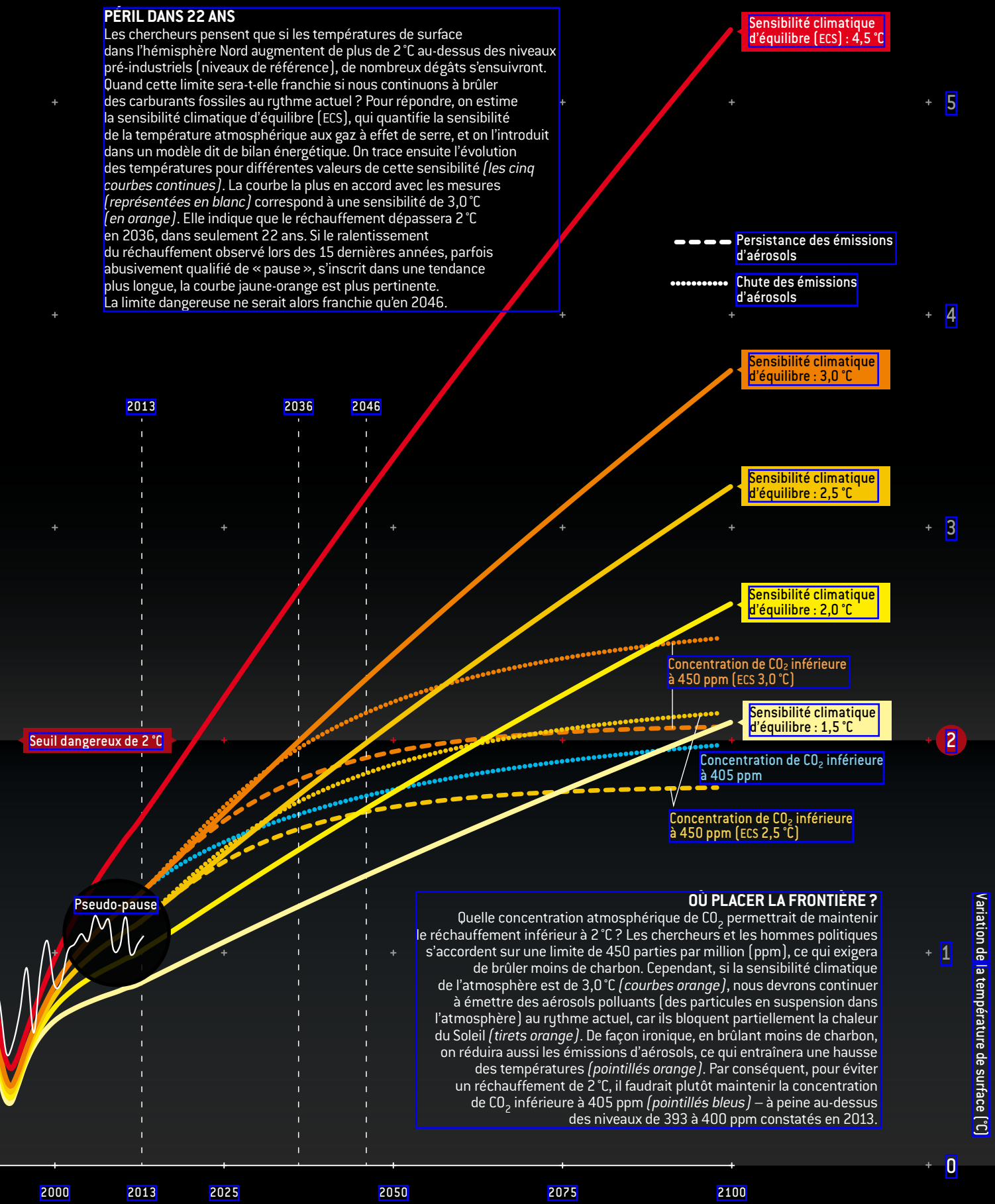
En d'autres termes, baisser la borne inférieure de 2 °C à 1,5 °C a peu de sens. Et même si la sensibilité climatique était

L'AUTEUR

Michael MANN est professeur de météorologie à l'Université de Pennsylvanie. Il a contribué aux travaux du Groupe intergouvernemental d'experts du climat (GIEC).



© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014



© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

inférieure d'un demi-degré par rapport à ce que l'on pensait précédemment, que faudrait-il en déduire ? Y aurait-il moins de risque à continuer de brûler des combustibles fossiles au rythme actuel ? Quand dépasserait-on un réchauffement critique ?

La plupart des chercheurs s'accordent sur le fait qu'un réchauffement de deux degrés au-dessus de la température de l'ère pré-industrielle affecterait de multiples domaines : l'approvisionnement en nourriture et en eau, la santé, la sécurité, la fourniture d'énergie, la prospérité économique... J'ai récemment calculé l'évolution des températures pour différentes valeurs de la sensibilité climatique, grâce à un modèle (simplifié) dit de bilan énergétique. De tels modèles sont utilisés pour étudier les divers scénarios climatiques possibles. Ils déterminent l'évolution de la température de surface moyenne en réponse aux changements naturels (éruptions volcaniques, variations de l'activité solaire, etc.) ou anthropiques, tels que l'émission de gaz à effet de serre ou de particules. Bien que critiqués, les modèles climatiques sont notre meilleur outil pour décrire le système climatique en fonction de paramètres physiques, chimiques et biologiques. Et ils ont fait leurs preuves : ainsi, il y a plusieurs décennies, le réchauffement récent a été prédit avec précision par les modèles.

Le calcul considérait des émissions de gaz à effet de serre se poursuivant au rythme actuel *(business-as-usual)*. Je l'ai effectué à plusieurs reprises, pour des valeurs de la sensibilité climatique à l'équilibre allant de la limite inférieure du GIEC (1,5 °C) à sa limite supérieure (4,5 °C). Les courbes les plus en accord avec les mesures récentes étaient celles correspondant à 2,5 °C et 3 °C. Les courbes obtenues avec une sensibilité climatique notablement plus basse ou plus haute s'accordaient peu aux mesures, renforçant l'idée qu'elles ne sont pas réalistes.

Sommes-nous près d'un seuil dangereux ?

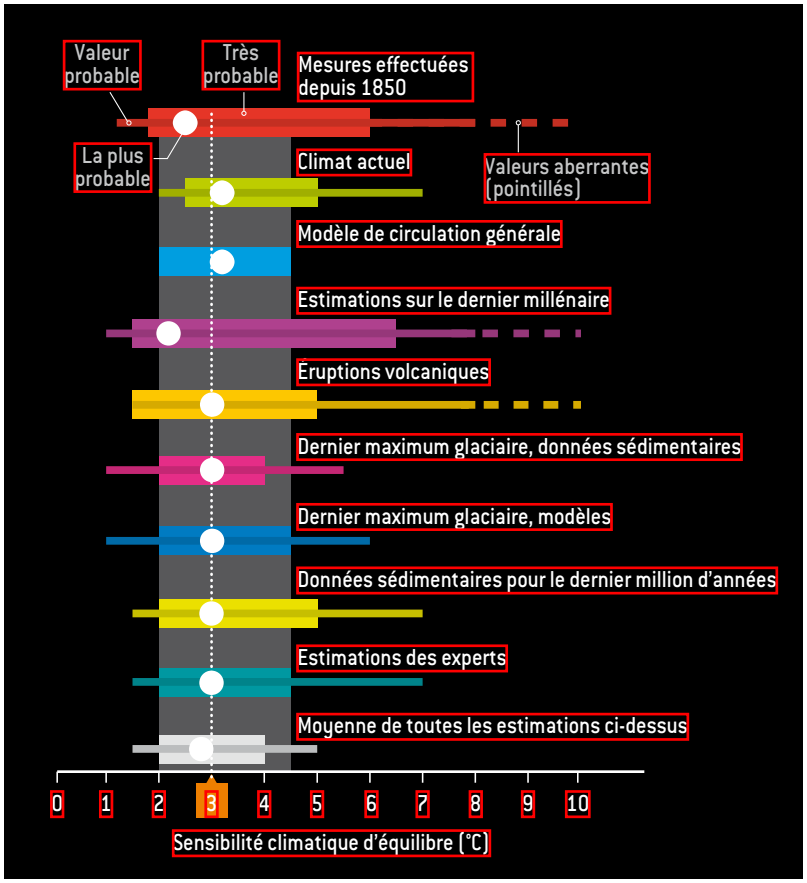
Ces calculs ont montré qu'avec une valeur de 3 °C, la planète franchirait la limite dangereuse correspondant à un réchauffement de 2 °C dans seulement 22 ans, en 2036. Si la sensibilité climatique n'est que de 2,5 °C, cette limite sera atteinte en 2046, soit dix ans plus tard *(voir la figure pages 64 et 65)*. Une moindre sensibilité ne ferait donc que retarder un peu l'échéance – mais ce délai pourrait se révéler précieux pour la lutte contre le réchauffement.

Que faire pour limiter ce dernier à moins de 2 °C ? Rappelons que la sensibilité climatique à l'équilibre représente la valeur du réchauffement pour un doublement de la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone. Une sensibilité de 3 °C signifie que pour garder le réchauffement inférieur à 2 °C, la concentration de CO_2 doit rester très inférieure au double du niveau préindustiel (560 ppm). Il faudrait qu'elle ne dépasse pas 450 ppm, voire moins si l'on prend en compte l'effet des aérosols. En brûlant moins de charbon, on réduirait certes les émissions de CO_2, mais aussi la quantité d'aérosols (telles les particules de sulfates) présents dans l'atmosphère ; or ces derniers ont un effet refroidissant, en faisant écran au soleil. La concentration atmosphérique de CO_2 à ne pas dépasser se situerait alors plutôt autour de 405 ppm.

Nous sommes pourtant près de la franchir. En 2013, la concentration de dioxyde de carbone a brièvement atteint 400 ppm pour la première fois depuis le début des enregistrements – et peut-être depuis plusieurs millions d'années, comme le suggère l'analyse des couches géologiques. Pour ne pas dépasser les 405 ppm, nous devrions cesser immédiatement de brûler des carburants fossiles. Une limite de 450 ppm autoriserait quelques années

À QUEL POINT LE CLIMAT EST-IL SENSIBLE AU CO_2 ?

La sensibilité climatique d'équilibre est le réchauffement que provoquerait un doublement de la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone, après stabilisation du climat. La valeur la plus probable est légèrement inférieure à 3 °C. C'est ce que montrent de nombreux calculs indépendants des températures anciennes, ainsi que de multiples modèles climatiques *(barres de couleur)*. La moyenne des estimations réalisées est représentée en bas du graphique *(barre grise)*.



Source : K. Knutti et G. Hegerl, *Nature geoscience*, vol. 1, novembre 2008

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

encore d'augmentation des émissions de carbone, qui devraient ensuite décroître de quelques pour cent par an. Si la sensibilité climatique est de 2,5 °C, la lutte contre le réchauffement sera un peu moins brutale, mais elle restera difficile.

Ce n'est pas la seule source d'inquiétude. La valeur limite de 450 ppm a été obtenue en ne considérant que les rétroactions dites rapides, résultant par exemple des changements dans les nuages, la vapeur d'eau et la banquise. Mais pour certains experts du climat, dont James Hansen, précédent directeur de l'Institut Goddard de la NASA pour les études spatiales, il existe aussi des rétroactions plus lentes, telles celles provoquées par l'évolution des glaces continentales. Les prendre en compte impliquerait que nous devrions faire redescendre la concentration de CO_2 à son niveau du milieu du XX^e siècle, soit 350 ppm, si nous voulons limiter les dommages liés au réchauffement. Cela nécessiterait de déployer des technologies coûteuses pour capturer le CO_2 atmosphérique.

En outre, l'idée qu'un réchauffement inférieur à 2 °C soit sans danger est subjective. Elle est fondée sur une estimation du moment où la majorité du globe sera exposée à des changements climatiques potentiellement irréversibles. Or des modifications destructrices se sont déjà produites dans certaines régions. En Arctique, la fonte de la banquise et le dégel du pergélisol nuisent aux populations indigènes et aux écosystèmes. Les nations insulaires vivant à basse altitude voient leurs terres et l'eau douce disparaître, en raison de la montée du niveau de la mer et de l'érosion. Dans ces régions, le réchauffement – qui va s'aggraver d'au moins 0,5 °C avec le CO_2 déjà émis – est dès à présent problématique.

Espérons que la sensibilité climatique correspond à l'estimation probable la plus faible, soit 2,5 °C. Cela autoriserait un optimisme prudent quant à la possibilité de prévenir des dégâts irréparables pour la planète. Mais c'est à la condition de réduire la dépendance aux énergies fossiles de façon urgente et notable. ■

▪ SUR LE WEB

Détails sur le modèle de bilan énergétique utilisé pour les simulations :
ScientificAmerican.com/apr2014/mann

▪ BIBLIOGRAPHIE

A. P. Schurer *et al.*, **Separating forced from chaotic climate variability over the past millennium,** *Journal of Climate*, vol. 26(18), pp. 6954-6973, 2013.

M. E. Mann, **The Hockey Stick and the Climate Wars,** Columbia University Press, 2012.

M. E. Mann, **Defining dangerous anthropogenic interference,** *PNAS*, vol. 106(11), pp. 4065-4066, 2009.

Climat : comment éviter la surchauffe ?, *Dossier Pour la Science*, n° 54, janvier-mars 2007.

La sélection de livres POUR LA SCIENCE

Mathématiques, astronomie, animaux...
Découvrez notre sélection de livres scientifiques et partez à la découverte des nanotechnologies, de l'humain, des catastrophes naturelles... et bien d'autres sujets encore !

Nouveauté **L'exploration des planètes**

De Galilée à nos jours… et au-delà

Thérèse Encrenaz et James Lequeux — **Réf. 70116195**

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

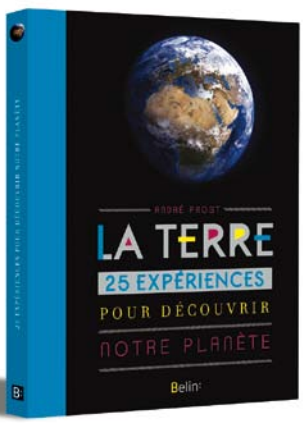
Éditions Belin 2014 – 224 pages – 24,50 € - ISBN 978-2-7011-6195-2

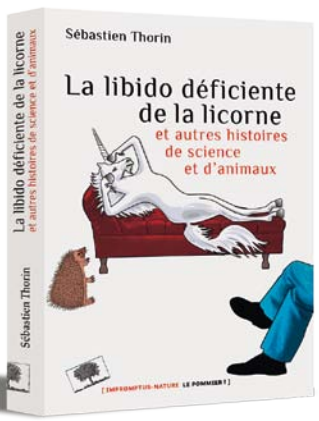
Nouveauté **La Terre - 25 expériences pour découvrir notre planète**

André Prost — **Réf. 70118965**

Comment naissent les dunes ? Comment une rivière creuse-t-elle une vallée ? Comment se produit un glissement de terrain ? Pourquoi les pierres se dressent-elles sous l'action du gel ? Etc. Dans ce livre, l'auteur propose 25 expériences ludiques et faciles à réaliser pour comprendre comment le vent, la pluie, la glace, les cours d'eau… modèlent le visage de la Terre.

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





Nouveauté **La libido déficiente de la licorne**

Et autres histoires de science et d'animaux

Sébastien Thorin — **Réf. 74650762***

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

Éditions Le Pommier 2014 - 160 pages - 15 € - ISBN 978-2-7465-0762-3

Dans la peau d'une plante

70 questions impertinentes sur la vie secrète des plantes

Catherine Lenne — **Réf. 70118315**

Fleur d'un jour, chêne millénaire, brin d'herbe, arbre majestueux : à la ville, au jardin, en promenades, les plantes nous entourent. Mais sait-on vraiment comment elles vivent ? En 70 questions impertinentes, le lecteur se trouve transporté dans la peau d'une plante : sa vie sexuelle, sa vie sociale, ses problèmes de poids, ses voyages, rien ne lui échappe ! Catherine Lenne, chercheuse en biologie végétale, n'a pas son pareil pour expliquer et faire partager sa passion des plantes. Facile à lire, scientifiquement irréprochable, ce livre comblera tous les curieux de nature et de connaissances !

Éditions Belin 2014
256 pages - 23 € - ISBN 978-2-7011-8315-2

Des catastrophes… « naturelles » ?

Virginie Duvat et Alexandre Magnan — **Réf. 74650679***

Xynthia, Katrina, Fukushima… Penser que les catastrophes naturelles sont la conséquence des colères de la nature et que nous n'y pouvons rien, c'est se voiler la face. Tempêtes, tremblements de terre et autres tsunamis ont certes une origine naturelle, mais les dégâts considérables qu'ils provoquent sont à mettre au crédit des sociétés humaines. Nous sommes des fabricants de catastrophes, pour le coup plus si « naturelles » que ça.

Éditions Le Pommier 2014
312 pages – 23 € - ISBN 978-2-7465-0679-4

En partenariat avec les éditeurs

Belin ÉDITEUR INDÉPENDANT DEPUIS 1777

Éditions Le Pommier

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

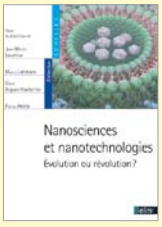
ou en renvoyant le bon de commande ci-contre.

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

COLLECTION ÉCHELLES

Privilégiant les savoirs les plus actuels, la collection « Échelles » propose des ouvrages scientifiques avec une présentation simple de questions réputées complexes !

Nanosciences et nanotechnologies
Évolution ou révolution ?



Jean-Michel Lourtioz, Marcel Lahmani, Claire Dupas-Haeberlin, Patrice Hesto

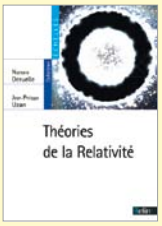
Réf. 70118354

Une synthèse interdisciplinaire sur les nanosciences et leurs applications, très illustrée, qui couvre un large spectre des recherches sur les « nanos », allant de la physique et la chimie aux biotechnologies, à la médecine et aux aspects environnementaux et sociétaux.

Éditions Belin 2014 - 448 pages - 45 €
ISBN 978-2-7011-8354-1

Théories de la relativité

Jean-Philippe Uzan et Nathalie Deruelle

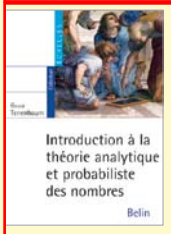


Réf. 70115848

L'ouvrage présente de façon synthétique, en trois grandes parties (Mécanique et gravitation newtoniennes ; Relativité restreinte et théorie de Maxwell et Relativité générale et gravitation), les trois représentations de l'espace et du temps, leurs domaines de validité et la manière dont elles s'articulent.

Éditions Belin 2013 - 656 pages - 40 €
ISBN 978-2-7011-5848-8

Introduction à la théorie analytique et probabiliste des nombres



300 exercices corrigés

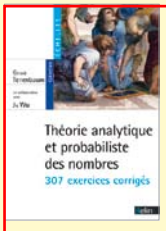
Gérald Tenenbaum

Réf. 70114750-5

Solide initiation aux méthodes analytiques et probabilistes de l'arithmétique, ce livre constitue une référence indispensable. Il fournit une présentation systématique, cohérente et autonome du domaine.

Éditions Belin 2008 - 592 pages – 47,20 €
ISBN 978-2-7011-4750-5

Théorie analytique et probabiliste des nombres
300 exercices corrigés



Gérald Tenenbaum et Jie Wu

Réf. 70118350

Plus de 300 exercices en complément de l'*Introduction à la théorie analytique et probabiliste des nombres*. Les plus simples proposent une application des notions fondamentales introduites dans le traité d'introduction ; d'autres, plus poussés, initient le lecteur à la recherche en théorie analytique des nombres.

Éditions Belin 2014 - 336 pages - 34 €
ISBN 978-2-7011-8350-3

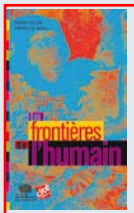
Qu'est-ce que la matière (n°18)

Françoise Balibar, Jean-Marc Lévy-Leblond et Roland Lehoucq

Réf. 74650767*

Ce petit livre nous révèle les secrets de cet Univers qui nous entoure et que nous connaissons si mal. Et pourquoi les étoiles brillent-elles ? Quel message nous envoie leur lumière ? Comment expliquer la variété et la répartition des atomes ? Quand et comment ont-ils été formés ?

Éditions Le Pommier 2014 - 192 pages - 10 €
ISBN 978-2-7465-0767-8



Les frontières de l'humain (n°19)

Henri Atlan et Frans de Waal

Réf. 74650768*

La vie, l'humain ont changé de statut : voici une nouvelle définition qui allie les apports de la philosophie, de la biologie et de l'éthologie !

Éditions Le Pommier 2014 - 144 pages - 10 €
ISBN 978-2-7465-0768-5

Tous ces livres sont également disponibles en librairie.

À LIRE AUSSI

Le monde des teintures naturelles (nouvelle édition)

Dominique Cardon

Réf. 70116143

Éditions Belin 2014
800 pages - 60 € - ISBN 978-2-7011-6143-3

Le livre des roses
Histoire des roses de nos jardins

Daniel Lemonier

Réf. 70117668

Éditions Belin 2014
336 pages – 38 € - ISBN 978-2-7011-7668-0

Trois prédateurs dans un salon
Une histoire du chat, du chien et de l'homme

Pierre Jouventin

Réf. 70118954

Éditions Belin 2014
224 pages - 18 € - ISBN 978-2-7011-8954-3

Le petit déjeuner du tarsier
Et autres indiscrétions du monde animal

François Moutou

Réf. 74650647*

Éditions Le Pommier 2013
192 pages - 20 € - ISBN 978-2-74650647-3

BON DE COMMANDE

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

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

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

J'indique mes coordonnées :

Nom :
Prénom :
Adresse :
C.P. : Ville :
Pays : Tél.* : facultatif
E-mail* :
@
pour recevoir la newsletter *Pour la Science* (à remplir en majuscules)

Je choisis mon mode de règlement :

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

Numéro
Date d'expiration
Cryptogramme

Signature obligatoire

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

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

DPL440 Offre valable jusqu'au 30/06/2014 dans la limite des stocks disponibles

HISTOIRE DES SCIENCES

Guldin et les indivisibles de Cavalieri

La préhistoire du calcul intégral, au XVII^e siècle, a été marquée par la querelle sur les « indivisibles » de l'Italien Bonaventura Cavalieri. Les raisons profondes de la controverse ne relevaient pas uniquement des mathématiques.

Amir ALEXANDER

Le calcul intégral est une partie des mathématiques qui, dans sa forme la plus simple et dans son principe, consiste à déterminer la longueur, l'aire ou le volume d'un objet en le découpant en petits morceaux que l'on additionne, et en procédant à des découpages de plus en plus fins. Un débat entre deux savants du XVII^e siècle a contribué à ses origines.

En 1635, le mathématicien italien Bonaventura Cavalieri avança l'idée que tout plan est composé d'une infinité de droites parallèles, et que tout volume est constitué d'une infinité de plans parallèles. Cette décomposition par la pensée d'une surface en lignes ou d'un volume en plans est au fondement de la « méthode des indivisibles » de Cavalieri. Selon cette méthode, deux figures planes (par exemple) ont la même aire si leurs indivisibles (les lignes parallèles qui les composent) ont les mêmes longueurs.

La méthode des indivisibles peut être considérée comme un ancêtre du calcul intégral. Mais les indivisibles de Cavalieri ont d'abord dû survivre aux attaques du mathématicien suisse Paul Guldin. Bien que le différend ait porté sur une question mathématique, on peut y déceler la trace de divergences plus profondes, liées au fait que Guldin et Cavalieri appartenaient à des ordres catholiques différents. Comme on va le voir ici, ces deux mathématiciens, le premier étant un jésuite et le second un jésuate, avaient une conception différente de l'utilisation des mathématiques pour comprendre la nature de la réalité.

Guldin critique les indivisibles de Cavalieri dans le livre IV de son *De Centro Gravitatis* (également intitulé *Centrobaryca*), paru en 1641. Tout d'abord, argumente Guldin, les preuves de Cavalieri ne sont pas des preuves constructives, telles que les mathématiciens classiques les aiment.

Dans l'approche euclidienne classique, les figures géométriques sont construites pas à pas, en partant du simple au plus complexe, à la règle et au compas. Chaque étape d'une preuve doit faire intervenir une telle construction, suivie d'une déduction des implications logiques pour la figure résultante.

Or Cavalieri procède à l'envers : il part de figures géométriques toutes faites telles que des paraboles, des spirales, etc., qu'il divise en un nombre infini de parties. Une telle procédure pourrait être qualifiée de déconstruction plutôt que de construction : son but n'est pas de construire une figure géométrique nouvelle, mais de déchiffrer la structure interne d'une figure existante.

1. BONAVENTURA CAVALIERI (1598-1647), statue datant de 1844, réalisée par Giovanni Antonio Labus et située dans la cour du palace de Brera, à Milan.

Guldin s'attaque ensuite aux fondements de la méthode de Cavalieri : l'idée qu'un plan soit composé d'une infinité de lignes, ou un solide d'une infinité de plans. Pour Guldin, c'est absurde : « Aucun géomètre n'acceptera jamais que la surface soit, et puisse être appelée en langage géométrique "toutes les lignes d'une telle figure". »

Lignes sans épaisseur

En d'autres termes, puisque les lignes n'ont pas d'épaisseur, on pourra en placer côte à côte autant qu'on voudra, on ne parviendra jamais à couvrir le plus petit morceau de plan qui soit. L'idée de Cavalieri de calculer l'aire d'une figure plane à partir de la dimension de « toutes ses lignes » est donc absurde.

Cela amène Guldin à son argument final. La méthode de Cavalieri repose sur l'établissement d'un rapport entre toutes les lignes d'une figure et toutes les lignes d'une autre. Or, souligne Guldin, les deux ensembles de lignes sont infinis, et le rapport d'une infinité sur une autre infinité n'a pas de sens. Vous aurez beau multiplier autant de fois que vous le voulez un nombre infini d'indivisibles, il ne dépassera jamais un autre ensemble infini d'indivisibles.

Prise globalement, la critique de la méthode de Cavalieri par Guldin incarnait les

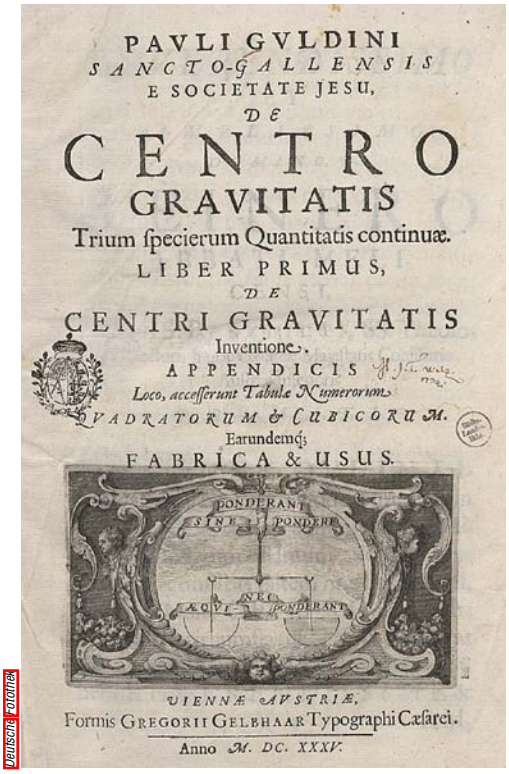
© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

principes fondamentaux des mathématiques jésuites. Christophorus Clavius (1538-1612), le fondateur de la tradition mathématique jésuite, et ses héritiers au sein de l'ordre pensaient que les mathématiques devaient procéder de façon systématique et déductive, en partant de postulats simples et en allant vers des théorèmes de complexité croissante, pour décrire les relations universelles entre les figures. Les preuves constructives étaient précisément la traduction de cet idéal.

Cette approche produisait une logique mathématique rigoureuse et hiérarchique qui, pour les Jésuites, était la principale raison justifiant les études dans ce domaine : elle démontrait qu'en procédant par déduction systématique, des principes abstraits construisent un monde fixe et rationnel dont les vérités sont universelles et incontestables. En cela, fit remarquer Clavius, la géométrie euclidienne était plus qu'aucune autre science proche de l'idéal jésuite de certitude, de hiérarchie et d'ordre. Il s'ensuit que l'insistance de Guldin à réclamer des preuves constructives n'était pas affaire de pédantisme ou d'étroitesse d'esprit, comme le pensaient Cavalieri et ses partisans, mais une expression des convictions profondes de son ordre religieux.

Il en va de même de la critique de Guldin portant sur la division des plans et des solides en « toutes les lignes » et « tous les plans ». Les mathématiques doivent être non seulement hiérarchiques et constructives, mais aussi parfaitement rationnelles et dépourvues de contradictions. Or Guldin jugeait les indivisibles de Cavalieri incohérents dans leur principe même, la notion qu'un continuum soit composé d'indivisibles étant selon lui contraire à la raison. « Des choses qui n'existent pas, et ne pourraient exister, ne peuvent être comparées », s'insurge-t-il, « et il n'est donc pas étonnant qu'elles conduisent à des paradoxes et à la contradiction, et finalement, à l'erreur. »

Pour les Jésuites, ces mathématiques étaient bien pires que pas de mathématiques du tout. Le but des mathématiques, après tout, était d'apporter ordre et stabilité au monde, alors que la méthode des indivisibles n'apportait que confusion et chaos. Si ce système défectueux était admis, les mathématiques ne pourraient plus être le fondement d'un ordre rationnel éternel. Le rêve jésuite, celui d'une stricte hiérarchie universelle aussi incontestable que les vérités de la géométrie, serait condamné.


PAVLI GVLDINI
SANCTO-GALLENSIS
E SOCIETATE JESU,
DE
CENTRO
GRAVITATIS
Trium ſpecierum Quantitatis continuæ.
LIBER PRIMUS,
DE
CENTRI GRAVITATIS
Inventione.
APPENDICIS
Loco, acceſſerunt Tabulæ Numerorum
QVADRATORUM & CUBICORUM.
Earundemq;
FABRICA & USUS.
PONDERANT
SINE PONDERE
NEC
AEQVE PONDERANT
VIENNÆ AVSTRIÆ,
Formis GREGORII GELEHAAR Typographi Cæſarei.
Anno M. DC. XXXV.

Deutsche Fotothek

Kunsthistorisches Museum, Wien, Gemäldegalerie, Inv. Nr. 1010

2. PAUL GULDIN (1577-1643), portrait anonyme datant de 1650 (Département de mathématiques de l'Université de Graz, en Autriche), et le frontispice de son ouvrage *De Centro Gravitatis* où, notamment, il critique l'idée des indivisibles de Cavalieri.

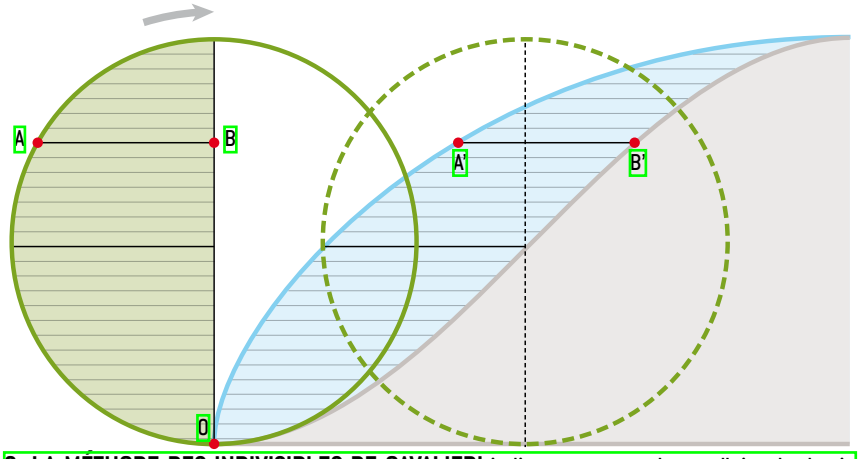
La théologie en filigrane

Dans ses écrits, Guldin n'expliquait pas les raisons philosophiques profondes de son rejet des indivisibles, pas plus que ne le firent les mathématiciens jésuites Mario Bettini et Andrea Tacquet, qui dénonçaient eux aussi la méthode de Cavalieri. En tant que mathématiciens, ces trois hommes devaient attaquer les indivisibles sur des bases mathématiques, et non philosophiques ou religieuses. Leur crédibilité mathématique ne pourrait que souffrir s'ils affirmaient être motivés par des considérations théologiques ou philosophiques.

Les participants au débat sur les indivisibles connaissaient bien évidemment les véritables enjeux, comme le mathématicien jésuate Stefano degli Angeli y fit allusion en écrivant qu'il ne savait pas « quel esprit » animait les mathématiciens jésuites. À de très rares exceptions près, le débat resta mathématique.

Quand Cavalieri fut confronté pour la première fois aux critiques de Guldin, en 1642, il se mit immédiatement au travail pour produire une réfutation détaillée. Il avait initialement prévu de répondre sous la forme d'un dialogue entre amis, un genre prisé par son mentor Galilée. Mais quand il montra l'ébauche à Giannantonio Rocca, un mathématicien ami, ce dernier l'en dissuada. Il était plus sûr, le mit en garde Rocca, de ne pas recourir au format désobligeant du dialogue, avec ses traits d'esprit et ses réparties condescendantes, susceptible de mettre en rage des opposants puissants. Mieux valait, conseilla Rocca, écrire une réponse directe aux accusations de Guldin, en se concentrant sur les questions strictement mathématiques et en s'abstenant de toute provocation « galiléenne ».

Ce que Rocca passa sous silence, c'est que, contrairement à Galilée, Cavalieri n'a jamais manifesté de génie littéraire dans ses écrits, ni de don pour présenter des



3. LA MÉTHODE DES INDIVISIBLES DE CAVALIERI indique par exemple que l'aire du demi-cercle *(en vert)* est égale à l'aire de la surface bleue, leurs « indivisibles » *(segments en noir)* étant simplement décalés. Ce résultat constitue une étape pour montrer que l'aire *(en bleu et gris)* délimitée par un cycle de cycloïde *(courbe en bleu)* est égale à trois fois l'aire du cercle – la cycloïde étant la courbe décrite par un point O du cercle lorsque celui-ci roule sur une droite.

L'AUTEUR

Amir ALEXANDER est historien des mathématiques à l'Université de Californie à Los Angeles.

Article adapté de l'ouvrage de l'auteur, *Infinitesimal : How a Dangerous Mathematical Theory Shaped the Modern World*, Scientific American/Farrar, Straus and Giroux, 2014.

BIBLIOGRAPHIE

A. R. Alexander, **Exploration Mathematics : The rhetoric of discovery and the rise of infinitesimal methods**, *Configurations*, vol. 9(1), pp. 1-36, 2001.

D. Descotes, « Le vertige de l'infini », dans **Pascal**, *Les Génies de la Science*, n° 16, pp. 32-51, 2003.

K. Anderson, **Cavalieri's method of indivisibles**, *Archive for the History of Exact Sciences*, vol. 31(4), pp. 291-367, 1985.

problèmes complexes de façon spirituelle et divertissante. Cavalieri fit probablement bien de suivre les conseils de son ami et de nous épargner un « dialogue » dans la prose indigeste et absconse qui le caractérisait. Et c'est ainsi que la réponse de Cavalieri à Guldin constitua le troisième « Exercice » de son dernier livre sur les indivisibles, *Exercitationes Geometricae Sex*, publié en 1647 et intitulé, assez platement, *In Guldinum* (« Concernant Guldin »).

Dans sa réponse, Cavalieri ne semble pas particulièrement troublé par la critique de Guldin. Il nie supposer que le continuum soit constitué d'un nombre infini de parties indivisibles, argumentant que sa méthode ne dépend pas de cette hypothèse. Si l'on croit que le continuum est composé d'indivisibles, alors oui, « toutes les lignes » s'additionnent pour donner une surface et « tous les plans » un volume ; mais si l'on n'admet pas que les lignes forment une surface, alors il y a sûrement quelque chose, en plus des lignes, qui constitue la surface et quelque chose, en plus des plans, qui constitue le volume. Rien de cela, soutient Cavalieri, n'a de conséquence sur la méthode des indivisibles, qui compare toutes les lignes ou plans d'une figure avec celles ou ceux d'une autre figure, indépendamment du fait que oui ou non ces éléments composent effectivement la figure.

L'argument de Cavalieri est peut-être techniquement acceptable, mais il n'en est pas moins de mauvaise foi. Quiconque a lu son ouvrage de 1635 *Geometria Indivisibilibus... promota* ou ses *Exercitationes* ne doute pas un instant qu'ils reposent sur l'intuition fondamentale que le continuum est formé d'indivisibles. La défense du jésuate sur ce point est un peu faible.

La réponse de Cavalieri à l'argument de Guldin selon lequel « un infini n'est pas en proportion ou en rapport avec un autre infini » est à peine plus convaincante. Cavalieri distingue deux types d'infini, affirmant qu'« un infini absolu » n'est effectivement pas en proportion avec un autre « infini absolu », mais que toutes les lignes et tous les plans ont un « infini relatif » et non absolu. Ce type d'infini, affirme-t-il alors, peut être (et est) en proportion avec un autre infini relatif. Comme précédemment, Cavalieri semble défendre sa méthode sur des bases techniques abstruses, recevables ou non par les autres mathématiciens. Dans un cas comme dans l'autre, son argument est sans rapport avec la véritable motivation de la méthode des indivisibles.

Mathématiques constructives ou non ?

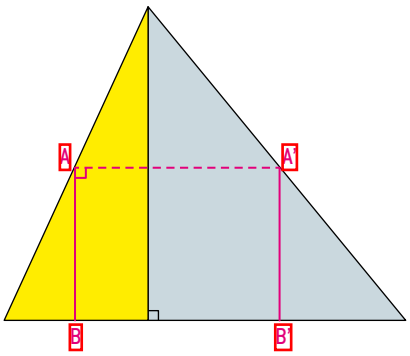
Cette motivation est finalement dévoilée dans la réponse de Cavalieri à l'accusation de Guldin de ne pas avoir correctement « construit » ses figures. Ici, la patience de Cavalieri arrive à bout, et il laisse apparaître le fond de sa pensée. Guldin a affirmé que toutes les figures, angles et lignes d'une preuve géométrique doivent être soigneusement construits à partir des principes premiers ; Cavalieri conteste cela catégoriquement. « Pour qu'une preuve soit vraie », écrit-il, « il n'est pas nécessaire de décrire effectivement ces figures analogues, mais il suffit de supposer qu'elles ont été décrites mentalement. »

Et c'est là que réside la véritable différence entre Guldin et Cavalieri, entre les Jésuites et les partisans des indivisibles. Pour les Jésuites, le but des mathématiques est de construire un monde qui soit un lieu fixe et éternel, où l'ordre et la hiérarchie ne puissent jamais être remis en cause. C'est pourquoi chaque élément du monde doit être soigneusement et rationnellement

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

construit, et pourquoi le moindre soupçon de contradictions et de paradoxes ne peut être toléré. C'est une mathématique « descendante », dont le but est d'apporter rationalité et ordre à un monde autrement chaotique.

Pour Cavalieri et les autres indivisibilistes, c'est exactement le contraire : les mathématiques ont pour point de départ une intuition matérielle du monde, qui leur suggère que les figures planes sont constituées de lignes, et les volumes de plans, de la même façon qu'une toile est tissée à partir de fil et qu'un livre se compose d'un assemblage de pages. Il n'est pas nécessaire de construire ces figures par le raisonnement, parce que nous savons qu'elles existent déjà dans le monde. Il suffit d'en admettre l'existence et d'étudier leur structure interne. Si nous rencontrons des paradoxes et contradictions apparents, ils sont forcément superficiels, et ne sont que le résultat des limites de notre compréhension. On peut soit les résoudre, soit les utiliser comme outil d'investigation. Mais ils ne devraient jamais nous empêcher d'explorer la structure interne des figures géométriques et les relations cachées entre les unes et les autres.



4. LA MÉTHODE DE CAVALIERI ne fonctionne pas toujours. Par exemple, l'aire du triangle jaune n'est pas égale à celle du triangle bleu, alors qu'à tout « indivisible » vertical AB du premier correspond un « indivisible » vertical A'B' de même longueur du second.

Pour les mathématiciens classiques tels que Guldin, la notion que l'on puisse fonder les mathématiques sur une intuition vague et paradoxale était absurde : « Qui sera le juge » de la vérité d'une construction géométrique, demande-t-il moqueusement à Cavalieri, « la main, l'œil ou l'intellect ? » Cavalieri trouvait qu'en insistant sur l'évitement des paradoxes, Guldin faisait montre d'un pédantisme vain. Selon Cavalieri, un tel ergotage risquait d'avoir de graves conséquences : si Guldin l'emportait, une méthode puissante serait perdue, et les mathématiques elles-mêmes seraient trahies. ■

LOGIQUE & CALCUL

Équations résolubles ou non ?

Parfois, une équation semble impossible à résoudre. Cette impossibilité est-elle théorique et définitive, ou peut-on la contourner ? En cherchant à répondre à de telles questions, les mathématiciens ont, au fil des siècles, franchi des étapes capitales.

Jean-Paul DELAHAYE

Au lycée, on apprend à résoudre des équations et des systèmes d'équations. L'élève qui a compris les méthodes enseignées traitera une large catégorie de problèmes. Pour chacun d'eux, il mettra en œuvre une « recette » qui, s'il procède avec soin, le conduira à la solution.

Les logiciels de calcul formel, *Sage, Pari/GP, Mathematica, Maple*, etc., se substituent à l'élève et, à l'aide de fonctions qui se nomment par exemple *solve*, font des calculs symboliques et traitent des équations trop compliquées pour le cerveau humain. Utilisant toute la puissance de nos machines et le savoir-faire des mathématiciens et ingénieurs qui développent et perfectionnent les algorithmes, ces logiciels sont d'incomparables experts en calcul. Le logiciel *Maple,* par exemple, trouve instantanément les quatre solutions de l'équation $X^4-6X^2+6=0$: $\sqrt{3+\sqrt{3}}, -\sqrt{3+\sqrt{3}}, \sqrt{3-\sqrt{3}}, -\sqrt{3-\sqrt{3}}$.

Il écrit ainsi les résultats, et non pas de manière approchée en donnant quelques décimales (ce qu'il sait faire aussi). Mieux, il trouve les six solutions de l'équation : $X^6-26X^5+250X^4-1160X^3+2749X^2-3134X+1320=0$, qui sont 1, 2, 3, 4, 5, 11. Il n'a aucun mal non plus quand on utilise des nombres transcendants comme coefficients (qu'il ne remplace pas par des valeurs approchées, mais traite symboliquement). Pour l'équation : $X^4-\pi X^3-6X^3+6\pi X^2+11X^2-11\pi X-6X+6=0$, en quelques fractions de seconde, il donne les solutions qui sont 1, 2, 3, π.

1. L'invention des nombres complexes

Jérôme Cardan a publié une méthode (sans doute due à son rival Tartaglia) pour résoudre les équations polynomiales de degré 3 à une inconnue. Comme pour celles de degré 2, il propose des formules qui donnent les solutions en fonction des coefficients de l'équation, notés ici a, *b, c* et *d,* et du nombre complexe *i*.

Les formules générales pour le troisième degré sont analogues à celles qu'on apprend à l'école pour le second degré... mais sont beaucoup plus compliquées. Nous les indiquons ci-dessous en notation moderne et sans démonstration, juste pour le plaisir esthétique.

L'*Ars Magna* de Jérôme Cardan a été publié en 1545. Il est écrit en latin. Cet ouvrage contient les premières solutions générales d'équations polynomiales de degré 3.

$$ax^3+bx^2+cx+d=0 \qquad a\neq 0$$

$$x_1 = S+T-\frac{b}{3a}$$

$$x_2 = -\frac{S+T}{2}-\frac{b}{3a}+\frac{i\sqrt{3}}{2}(S-T)$$

$$x_3 = -\frac{S+T}{2}-\frac{b}{3a}-\frac{i\sqrt{3}}{2}(S-T)$$

$$S=\sqrt[3]{R+\sqrt{Q^3+R^2}}$$

$$T=\sqrt[3]{R-\sqrt{Q^3+R^2}}$$

$$Q=\frac{3ac-b^2}{9a^2}$$

$$R=\frac{9abc-27a^2d-2b^3}{54a^3}$$

HIERONYMI CAR
DANI, PRÆSTANTISSIMI MATHE
MATICI, PHILOSOPHI, AC MEDICI,
ARTIS MAGNÆ,
SIVE DE REGVLIS ALGEBRAICIS,
Lib. unus. Qui & totius operis de Arithmetica, quod
OPVS PERFECTVM
inscripsit, est in ordine Decimus.

HAbes in hoc libro, studiose Lector, Regulas Algebraicas (Itali, de la Cosa uocant) nouis adinuentionibus, ac demonstrationibus ab Authore ita locupletatas, ut pro pauculis antea uulgò tritis, iam septuaginta euaserint. Nec ea solum, ubi unus numerus alteri, aut duo uni, uerum etiam, ubi duo duobus, aut tres uni æquales fuerint, nodum explicant. Hunc aũt librum ideo seorsim edere placuit, ut hoc abstrusissimo, & planè inexhausto totius Arithmeticæ thesauro in lucem eruto, & quasi in theatro quodam omnibus ad spectandum exposito, Lectores incitarẽtur, ut reliquos Operis Perfecti libros, qui per Tomos edentur, tanto auidius amplectantur, ac minore fastidio perdiscant.

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

Se posent alors plusieurs questions. Ce que font ces logiciels est-il parfait ? Seront-ils améliorables jusqu'à résoudre toute équation ? Seront-ils confrontés à des difficultés insurmontables et si oui, connaît-on des équations définitivement insolubles ?

Les réponses à ces questions exigent une formulation plus précise, mais si nous faisons cet effort, alors ce que nous apprennent les mathématiques et la logique est extrêmement clair... et souvent inattendu. Au passage, nous constaterons que de nombreux progrès mathématiques proviennent de l'étude des équations insolubles, ou qui apparaissaient telles. C'est en comprenant la nature des insolubilités que de profondes avancées se produisent, dont l'histoire est loin d'être achevée. Ces avancées annoncent peut-être des mathématiques créées par les ordinateurs, que David Ruelle entrevoit *(voir l'encadré 5)*.

On sait depuis l'Antiquité que certaines équations n'ont pas de solution, ou du moins n'en ont pas du genre qu'on aurait aimé. L'équation $X^2 - 2 = 0$, équivalente à $X^2 = 2$, provoqua une révolution mathématique. La résoudre, c'est trouver des nombres qui, multipliés par eux-mêmes, donnent 2.

Les mathématiciens grecs recherchaient et attendaient une solution sous la forme d'un quotient de deux entiers. Au V^e siècle avant notre ère, Hippase de Métaponte découvrit, du moins d'après ce qu'on croit savoir de l'histoire de cette période peu documentée, qu'on n'y arriverait jamais. Il n'existe pas de solution à cette équation de la forme $X = n/d$ avec n et d entiers. C'était très ennuyeux, car la diagonale d'un carré de côté 1 a pour longueur un nombre X qui vérifie l'équation, ce qui rend donc inconcevable de nier l'existence d'une solution à l'équation !

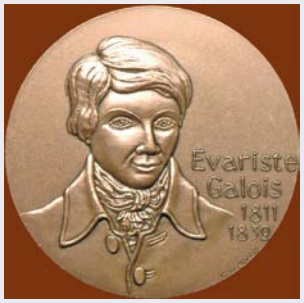
Prouver l'inexistence de n et d est simple et procède d'un raisonnement par l'absurde. Il utilise le fait que le carré d'un nombre impair l'est aussi, ce qui est évident car $(2m + 1)^2 = 4m^2 + 4m + 1$, et des manipulations faciles. Supposons qu'il existe un couple d'entiers (n, d) tel que $(n/d)^2 = 2$, et montrons que cela conduit à une contradiction. On peut supposer que n est impair ou que d est impair (si n et d sont tous les deux pairs, on les divisera par 2 autant de fois que nécessaire). On tire de l'égalité supposée que $n^2 = 2d^2$, dont on déduit que n est pair (s'il était impair, n^2 le serait et ne pourrait pas être égal à $2d^2$, qui est pair). En posant $n = 2n'$, on obtient $4n'^2 = 2d^2$, donc $2n'^2 = d^2$. On en tire alors que d est pair (s'il était impair, d^2 le serait aussi et ne pourrait être égal à $2n^2$). On a ainsi prouvé que n et d étaient tous les deux pairs, ce qui contredit le fait que nous avions déjà simplifié la fraction n/d. L'équation $X^2 - 2 = 0$ est donc insoluble, pour celui qui ne recherche que des solutions s'écrivant comme quotient des deux entiers.

Aujourd'hui, on sait qu'en acceptant les nombres irrationnels (non-quotients de deux entiers), l'équation est résoluble, et qu'elle a deux solutions que nous écrivons $\sqrt{2}$ et $-\sqrt{2}$. Le nombre $\sqrt{2}$ se calcule aussi loin qu'on le souhaite, bien que son écriture en base 10 (ou n'importe quelle base) ne s'arrête jamais (puisqu'il est irrationnel) : $\sqrt{2} = 1{,}41421356237309504880168872...$

La morale de cette histoire est que, pour mesurer les objets les plus simples de la géométrie, nous ne pouvons nous contenter des quotients de deux entiers. L'élémentaire figure géométrique d'un carré nous oblige à accepter l'infinité des chiffres de certains nombres. La notion moderne

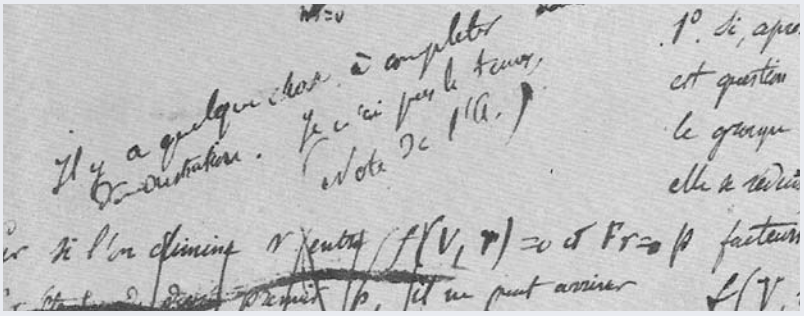
2. L'équation du cinquième degré

Les équations polynomiales de degré 5 ne possèdent pas toujours de solution s'exprimant à l'aide des coefficients de l'équation, des opérations usuelles (addition, soustraction, multiplication, quotient) et du symbole de racine (cinquième ou autre). Cette insolubilité par radicaux des équations de degré 5 ou plus fut établie par Niels Abel, et précisée par Évariste Galois. Leurs travaux mirent fin à une quête infructueuse de plus de trois siècles, durant lesquels on chercha à généraliser les méthodes de Cardan pour le troisième degré et de Ferrari pour le quatrième.



Abel (1802-1829) et Galois (1811-1832) sont morts jeunes et mal compris. Toutefois le biographe d'Abel, Carl Anton Bjerknes, écrivit : « Au reste, ne regrettons pas trop que l'existence d'Abel se soit passée si tristement. Celui qui, pendant toute sa vie, a dû aller à une aussi rude école, a le privilège de voir et de penser autrement que la majorité des hommes ; et si, par ses efforts et ses études profondes, il a acquis le don de lire les pensées des temps à venir, il ne se fait pas l'illusion d'être compris par les siens ou par ses contemporains. Mais, quand le bonheur lui échapperait, il n'en a pas moins beaucoup vu, et il sait qu'il n'a pas vécu en vain. »

La veille de sa mort en duel, Galois annota son mémoire sur la théorie de l'insolubilité des équations de degré supérieur à 5. Pressé par le temps, il écrivit *(ci-dessous)* : « Il y a quelque chose à compléter dans cette démonstration. Je n'ai pas le temps ».



Jean Dubout avec l'autorisation de la bibliothèque de l'Institut

3. Faisable ou pas ?

Certains problèmes d'équations ou d'inéquations sont traitables par algorithme, d'autres non. Le travail du mathématicien est de préciser l'endroit exact où passe cette frontière entre le possible et l'impossible.

Voici deux exemples, l'un d'un problème décidable et l'autre d'un problème indécidable, proposés en 2002 par Miklós Laczkovich (*Proc. of the Am. Math. Soc.*, vol. 131, pp. 2235-2240).

1) On considère toutes les expressions $f(x)$ utilisant des nombres entiers, l'addition, la soustraction, la multiplication, x, $\sin(x^n)$, et $\sin(x.\sin(x^n))$. Exemple : $f(x) = 3\sin(\sin(x^5))\sin(x^3) - 1$.

Il n'existe pas d'algorithmes permettant de savoir, pour toute expression $f(x)$ de ce type, s'il existe un nombre réel x tel que $f(x) > 0$.

2) On considère toutes les expressions $f(x)$ utilisant des nombres entiers, l'addition, la soustraction, la multiplication, x, $\sin(x^n)$, $\cos(x^n)$. Exemple : $f(x) = 3\sin(x^5) + \cos(x^3)\sin(x^2) - \cos(x^7)$.

On connaît un algorithme permettant de savoir, pour toute expression $f(x)$ de ce type, s'il existe un nombre réel x tel que $f(x) > 0$.

de nombre réel est née d'une insolubilité rencontrée par les Grecs.

Les équations polynomiales à coefficients entiers ont d'ailleurs été à l'origine d'autres progrès mathématiques quelques siècles plus tard, notamment l'introduction des nombres complexes.

L'équation $X^2 + 2X + 2 = 0$ n'a pas de solutions réelles : le carré d'un nombre réel est toujours positif ou nul, d'où :
$X^2 + 2X + 2 = X^2 + 2X + 1 + 1$
$= (X+1)^2 + 1 \geqslant 1 > 0$.

Aucun nombre réel, rationnel ou irrationnel, ne peut annuler le polynôme qui ne prend que des valeurs strictement positives. On a affaire à une équation insoluble. Comme précédemment, elle ne l'est plus si on élargit notre idée de nombres et qu'on envisage que les nombres négatifs soient des carrés. Jérôme Cardan, au milieu du XVI[e] siècle, franchit ce pas téméraire, qui a conduit à la théorie des nombres complexes.

En introduisant un nombre i dont le carré est -1 (c'est-à-dire $i^2 = -1$), on obtient un ensemble de nombres particulièrement intéressants, les nombres complexes. Ils permettent d'affirmer qu'une équation polynomiale de degré n possède toujours n solutions (théorème fondamental de l'algèbre). Un autre énoncé plus précis est que tout polynôme de degré n, à coefficients réels ou complexes, se factorise sous la forme du produit d'une constante c par n monômes $(X - s)$ avec c et s des nombres complexes (les s sont les racines du polynôme).

Les logiciels de calcul formel utilisent les nombres complexes. Ils indiquent ainsi que l'équation $X^2 + 2X + 2 = 0$ a deux solutions $s_1 = -1 + i$ et $s_2 = -1 - i$, ce qui conduit à la factorisation : $X^2 + 2X + 2 = [X - (-1 + i)][X - (-1 - i)]$.
Un autre problème d'équation insoluble est à l'origine de l'algèbre moderne. La méthode apprise au lycée pour résoudre les équations du second degré utilise des racines carrées. Souvenez-vous : $aX^2 + bX + c = 0$; $\Delta = b^2 - 4ac$, $s = (-b \pm \sqrt{\Delta})/2a$.

Résoluble par radicaux ?

La méthode s'étend aux équations du second degré à coefficients complexes. Mieux, toujours grâce aux nombres complexes, Cardan montra (en volant semble-t-il l'idée à Niccolo Fontana Tartaglia) que toute équation du troisième degré a des solutions qui s'expriment à l'aide de racines cubiques. Mieux encore, Ludovico Ferrari établit que toute équation du quatrième degré a des solutions qui s'expriment avec des racines quatrièmes. On s'est alors imaginé qu'on trouverait des formules utilisant les racines n-ièmes pour résoudre les équations polynomiales de degré n.

Ce problème de la « résolubilité des équations de degré n par radicaux n-ièmes » se révéla plus coriace que prévu : pendant presque trois siècles, on a essayé en vain de trouver une méthode générale pour les équations de degré 5, qui aurait succédé à celle de Ferrari.

L'illusion fut dissipée quand le mathématicien norvégien Niels Abel (1802-1829) prouva en 1824 que certaines équations de degré 5, comme $X^5 - 3X - 1 = 0$, ne sont pas résolubles par radicaux. Une telle équation a bien cinq solutions comme l'indique le théorème fondamental de l'algèbre, mais on ne peut pas les exprimer en utilisant seulement les notations usuelles et les radicaux cinquièmes (ou autres). Vouloir ne considérer comme nombre que ce qu'on obtient à partir des entiers, des radicaux et des opérations arithmétiques habituelles, comme vouloir se limiter aux nombres quotients d'entiers, rend insolubles des équations qui ont pourtant des solutions. Dit autrement : ajouter $\sqrt{2}$ et les nombres du même type ne suffit pas pour avoir tous les nombres réels.

Notre logiciel de calcul indique que l'équation $X^5 - 3X - 1 = 0$ a trois solutions réelles et deux solutions complexes. Il n'en propose pas des expressions formelles, puisqu'elles n'existent pas, mais il les écrit sous forme approchée quand on le lui demande :
$X_1 = 1{,}38879198440725\ldots$
$X_2 = -334734141943352\ldots$
$X_3 = -1{,}21464804269846\ldots$
$X_4 = 0{,}080295100117\ldots + 1{,}3283551098\ldots i$
$X_5 = 0{,}080295100117\ldots - 1{,}3283551098\ldots i$.

Notons que Abel avait été précédé par le mathématicien italien Paolo Ruffini (1765-1822) qui affirma l'insolubilité par radicaux des équations de degré supérieur à 4, mais sans en proposer de démonstrations satisfaisantes. Le jeune et génial mathématicien français Évariste Galois (1811-1832) perfectionna les résultats d'Abel, ouvrant la voie au point de vue structural en algèbre qui prévaut encore aujourd'hui. Les trois découvreurs de l'insolubilité par radicaux des équations de degré supérieur à 4, du fait de la nouveauté de leurs travaux, ne réussirent que très difficilement à les faire reconnaître par la communauté mathématique. Celle-ci les considéra avec scepticisme ou mépris, avant

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

d'encenser ces exceptionnels inventeurs… après leur mort.

Cela n'était pas du tout évident au moment où les extensions de la notion de nombres furent proposées, mais la leçon est que si on se donne une équation et un domaine de nombres dans lequel on recherche les solutions, il se peut que la réponse soit : « Dans le domaine où vous recherchez des solutions, vous n'en trouverez pas ! ». En mathématiques, établir « Ce problème n'a pas de solution » est une façon parfaitement satisfaisante de le résoudre… pourvu que l'insolubilité soit démontrée. De plus, se dégager de l'insolubilité en introduisant de nouveaux nombres est une méthode féconde et un moteur efficace du progrès.

Le problème dit des *n* corps est moins connu, mais d'une nature comparable aux questions que nous venons de mentionner. Il s'agit de déterminer les trajectoires de *n* corps soumis aux forces de gravitation. Dans le cas de deux corps, la solution des équations a été donnée par Newton. Pour plus de deux corps, le problème est souvent présenté comme insoluble. Pourtant, ce n'est vrai que si l'on recherche des solutions d'un certain type ou par des méthodes fixées à l'avance. On a tort de dire que le problème des *n* corps est insoluble, en laissant entendre qu'il présente des difficultés mathématiques insurmontables ou qu'il n'a pas du tout de solution.

Ce problème possède des solutions que la nature calcule, seule, sans mal, et que nos machines savent aussi déterminer avec une précision aussi grande qu'on le veut. Les insolubilités mentionnées ne sont que partielles, comme quand on voulait des solutions avec radicaux pour les équations de degré supérieur à 4. Sur un plan pratique, même quand les solutions d'une équation de degré supérieur à 4 ne s'expriment pas avec des radicaux, on sait en calculer des valeurs approchées aussi bonnes qu'on le souhaite. On dispose d'excellentes techniques pour traiter le problème des *n* corps et mener des simulations de la dynamique de *n* corps avec un million de corps quand on prend en compte les collisions, et avec un milliard de corps si on néglige les collisions.

Dans le cas du problème des trois corps, quelque chose d'intéressant et d'inattendu se produit. Une solution analytique exacte a été découverte par Karl Sundman en 1909. Elle se présente sous la forme de séries infinies dont la convergence est extrêmement lente, au point qu'il faudrait utiliser $10^{8\,000\,000}$ termes de ces séries pour obtenir une précision équivalente à celle des calculs habituels d'éphémérides. Ces séries sont donc inutiles et, pour résoudre le problème numérique, on utilise des méthodes approchées générales plutôt que les séries de Sundman. Rechercher des solutions ayant de belles expressions mathématiques est ici contre-productif !

Notons que la recherche sur ces sujets se poursuit avec, parfois, d'étonnantes découvertes. En 2013, Milovan Suvakov et Veljko Dmitrasinovic de l'Université de Belgrade découvrirent à l'aide de calcul massif par ordinateur 13 nouvelles familles de solutions périodiques au problème des trois corps, complétant les trois familles périodiques déjà connues, dues à Lagrange et Euler pour la première, à Roger Broucke et Michel Hénon pour la seconde et à Christopher Moore pour la troisième.

Quand le calcul numérique est impossible

Pour de nombreuses familles d'équations, les méthodes numériques donnent des résultats satisfaisants, qu'on cherche bien évidemment à perfectionner, par exemple pour que la convergence des calculs soit plus rapide – une tâche sans fin. Il existe pourtant un cas remarquable où la situation est désespérée, même en utilisant des méthodes numériques.

Le nombre Ω (oméga) de Chaitin, défini comme une probabilité d'arrêt d'une certaine machine abstraite, est la solution d'une équation faisant intervenir une énumération de machines élémentaires. C'est un nombre parfaitement défini, dont on peut approcher la valeur en menant des calculs, ce qui d'ailleurs a été fait en 2002 par Cristian Calude, Michael Dinneen et Chi-Kou Shu. Cependant, cette résolution d'équation est déconcertante pour une double raison.

– On sait produire des suites de nombres rationnels (r_n) ayant Ω pour limite, mais on ne sait pas dire jusqu'où il faudrait aller dans la suite pour avoir une erreur inférieure à $1/n$ par exemple. En calculant (r_n) on est certain qu'on s'approche, mais il est impossible de proposer des évaluations de l'erreur qui tendent vers 0 quand *n* augmente.

– On sait que toute suite de nombres rationnels (r_n) calculée par algorithme et approchant Ω le fait plus lentement que n'importe quelle suite calculable de nombres rationnels s'approchant de 0. La convergence vers 0 de l'erreur est assurée, mais elle sera toujours plus lente que celle de $1/n$, plus lente que celle de $1/[\ln(n)]$, plus lente que celle de $1/[\ln(\ln(n))]$, etc. ($[x]$ désigne la

4. L'insolubilité du problème des trois corps

Le problème des *n* corps en physique donne des équations difficiles à résoudre analytiquement dès que *n* est supérieur à 2. Mais cette impossibilité de résoudre le problème en produisant des solutions dotées d'expressions mathématiques simples

(il y a diverses façons de définir ce que sont de telles expressions) est analogue à l'impossibilité de la résolution des équations polynomiales de degré 5 par radicaux et ne signifie pas que les équations sont insolubles. Les méthodes de calcul approché réussissent très bien à les résoudre. On les perfectionne sans relâche et aujourd'hui, on sait simuler la dynamique de systèmes de *n* corps avec *n* dépassant un million.

Les progrès réalisés par les méthodes numériques portent aussi sur la classification des solutions périodiques du problème des trois corps. En 2013, Milovan Suvakov et Veljko Dmitrasinovic de l'Université de Belgrade ont ainsi découvert 13 nouvelles familles de solutions périodiques au problème des trois corps. (voir la prépublication http://arxiv.org/pdf/1303.0181v1.pdf).

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

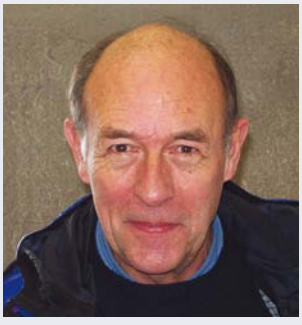
5. Les ordinateurs prendront-ils le pouvoir ?

Les logiciels de calcul formel, de démonstration automatique et les assistants de preuve (qui aident le mathématicien à écrire des démonstrations sans erreur) conduisent à une pratique des mathématiques où l'ordinateur tient un rôle de plus en plus important.

Dans un article intitulé *Post-Human Mathematics*, le mathématicien-physicien David Ruelle, professeur honoraire à l'IHÉS, s'interroge sur l'avenir des mathématiques quand les ordinateurs y joueront un rôle peut-être devenu dominant (http://arxiv.org/pdf/1308.4678.pdf).

« Ma conclusion temporaire est que nous ne pouvons pas exclure que les ordinateurs puissent penser, mais que s'ils y arrivent, alors ce sera d'une façon très différente de celle des humains. La situation est un peu semblable à celle de la chimie organique de synthèse : la synthèse de composés organiques n'est pas impossible, loin de là, mais on y arrive en général en procédant d'une façon très différente des organismes vivants. [...] Les mathématiques d'aujourd'hui sont une construction humaine où les ordinateurs sont de plus en plus utilisés, mais ne jouent pas un rôle créatif.

La situation pourrait changer : les ordinateurs pourraient devenir créatifs, et puisqu'ils fonctionnent d'une manière très différente des cerveaux humains, ils pourraient produire des mathématiques très différentes. [...]. Je ne suis pas impatient de voir les ordinateurs remplacer les mathématiciens humains. Ce serait, ou ce sera, une chose triste à certains égards, mais je ne veux pas être aveugle à cette éventualité. Les effets de la synthèse organique industrielle sur l'humanité ont été énormes, ce fut parfois bien et parfois terrible, mais aucun retour en arrière à l'époque pré-Wohler n'est possible. De même, les mathématiques entrent probablement dans une ère nouvelle, et il est sans aucun doute intéressant de deviner ce qu'elle sera. »



partie entière de x, utilisée ici pour avoir des suites de nombres rationnels).

L'équation dont Ω est solution est donc insoluble en ce sens qu'aucune méthode ne sera jamais efficace pour en calculer la solution même de manière approchée. Cette forme d'insolubilité pratique que la théorie du calcul et la logique mathématique nous offrent ici est loin d'être la seule que le XX^{e} siècle a mise en évidence. Elle prolonge les résultats d'insolubilité de Ruffini, Abel et Galois.

Des algorithmes pour toute équation ?

Nous qualifierons cependant tous ces cas d'insolubilité de bénins : on sait que l'équation n'a pas de solution ou on sait que, du fait de sa nature, elle a des solutions qu'on ne connaîtra que de manière approchée et même parfois sans pouvoir contrôler l'erreur, mais au fond, l'équation est quand même traitée. Ce qui importe pour le mathématicien et encore plus pour l'ingénieur qui perfectionne les programmes de calcul formel est la mise au point de méthodes générales permettant de résoudre une famille d'équations.

En algèbre linéaire, on sait par exemple comment s'y prendre face à n'importe quel système d'équations du type :

$$\begin{aligned} x + 2y + 3z &= 1,\\ x + 3y + 2z &= 1,\\ 3x + y + 2z &= 1, \end{aligned}$$

dont $x = y = z = 1/6$ est l'unique solution, ce qu'un logiciel de calcul formel trouve immédiatement. La présence de coefficients irrationnels ne gêne pas un bon logiciel, qui résoudra sans plus de peine un système tel que :

$$\begin{aligned} x + 2y + 3z &= \pi + 5,\\ 2x + 3y + 2z &= 2\pi + 5,\\ 3x + \pi y + \pi z &= 5\pi, \end{aligned}$$

dont les solutions sont $x = \pi$, $y = z = 1$.

Des algorithmes mis au point par les mathématiciens sont introduits dans le programme des logiciels de calcul formel. Ils traitent donc parfaitement des familles entières d'équations et de systèmes d'équations, voire d'inéquations. La question est alors de savoir si on pourra toujours aller plus loin dans la mise au point d'algorithmes qui fonctionneraient pour des familles variées d'équations et d'inéquations, de plus en plus vastes.

Par expérience, on sait depuis longtemps qu'il est difficile de résoudre les équations polynomiales à coefficients entiers comme $X^2 + 5Y^3 + 2Z^4 = 11$ dont on cherche des solutions entières. Ces équations sont dites diophantiennes (en l'honneur du mathématicien grec Diophante d'Alexandrie). David Hilbert affirma en 1900 qu'il n'existait probablement pas de méthode générale pour les résoudre. L'un des grands succès de la logique mathématique fut de donner un sens et une démonstration à cette intuition. Achevant un travail commencé par les chercheurs américains Martin Davis, Hilary Putnam et Julia Robinson, le mathématicien russe Yuri Matiyasevich prouva en 1970 qu'il n'existe pas d'algorithme permettant de savoir, pour toute équation diophantienne, si elle a ou non des solutions entières.

Cette « indécidabilité du dixième problème de Hilbert » signifie que les logiciels de calcul formel ne sont pas tout-puissants. Jamais on n'en programmera un qui, face à n'importe quelle équation diophantienne, saura dire si elle possède des solutions entières, et *a fortiori* les déterminer quand il y en a.

Aujourd'hui encore, on s'intéresse aux équations diophantiennes. On recherche non plus des solutions qui soient des nombres entiers, mais des nombres appartenant à d'autres structures algébriques. Des résultats

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

positifs et négatifs sont obtenus, précisant le paysage de l'insolubilité selon les familles de nombres que l'on considère. Le travail du mathématicien est devenu double : trouver des méthodes algorithmiques de résolution pour des familles d'équations les plus larges possible et, le cas échéant, démontrer que de telles méthodes n'existent pas.

Kirsten Eisenträger et Alexandra Shlapentokh ont ainsi établi en 2013 un résultat très général résolvant le dixième problème de Hilbert pour les équations diophantiennes dont on recherche les solutions parmi les fonctions. Assez étrangement, un problème très simple de cette catégorie reste obstinément mystérieux : celui des nombres rationnels. En effet, on ignore s'il existe oui ou non un algorithme permettant de trouver les solutions rationnelles de toute équation polynomiale à coefficients rationnels.

Simplifier n'importe quelle expression ?

Terminons en mentionnant un résultat inattendu qui montre que même la vérification d'une formule ou sa simplification pose parfois d'insurmontables difficultés.

Si on vous souffle que $X = 1$, $Y = 2$ et $Z = 3$ est une solution de l'équation diophantienne $X^2 + 2Y^3 - 3Z - 8 = 0$, vous n'aurez aucun mal à le vérifier (il suffit de remplacer les variables de la partie gauche par les valeurs proposées, et de faire le calcul). Vérifier une identité semble être une simple question de patience qu'un ordinateur sera toujours capable de mener. Contrôler que des solutions proposées pour une équation sont correctes est une tâche plus facile qu'en trouver les solutions : c'est la fameuse asymétrie entre « trouver » et « vérifier », si utile en cryptographie. Pourtant, même le travail de vérification peut être difficile : il existe des familles de problèmes de vérifications qu'aucun algorithme ne traitera jamais parfaitement.

Parmi les identités faisant intervenir les fonctions $\sin x$ et $\cos x$, on a la fameuse relation $\sin^2 x + \cos^2 x = 1$, ainsi que $\sin 2x = 2 \sin x \cos x$, dont on déduit par exemple : $4 \sin^2 x \cos^2 x + \cos^2 2x - 1 = 0$. Un logiciel de calcul formel trouve effectivement 0 quand on lui demande de simplifier $4 \sin^2 x \cos^2 x + \cos^2 2x - 1$. Plus compliqué (j'ai essayé !), il trouve aussi que $2 \sin x \cos x + 4 \cos^3 x - 3 \cos x - \sin 2x - \cos 3x$ vaut 0 pour tout x.

Face à de telles identités, dispose-t-on de méthodes de simplification efficaces et générales, c'est-à-dire garantissant que si on leur donne une expression identiquement nulle, elles s'en apercevront ?

Le théorème de Daniel Richardson, démontré en 1968 et récemment perfectionné par Mikloz Laczkovich, indique que, là encore, le pouvoir des algorithmes est limité. Ce théorème décrit une catégorie de problèmes de simplification qu'aucun algorithme ne sera jamais capable de traiter parfaitement.

D. Richardson considère toutes les expressions désignant des fonctions d'une variable réelle et construites en utilisant des nombres rationnels, les constantes π et $\ln(2)$, les fonctions $\sin x$, $\exp x$ et $|x|$ (valeur absolue de x), et les opérations d'addition, de soustraction, de multiplication et de composition de fonctions. Il démontre qu'aucun algorithme ne peut reconnaître toutes les expressions désignant la fonction nulle. Autrement dit, aucune méthode automatique ne sera jamais capable de simplifier toutes les formules qui peuvent l'être.

Une multitude de résultats de ce type sont maintenant connus concernant les équations entre mots, entre matrices, entre fonctions, ou concernant le calcul automatique des primitives. Ils nous apprennent que l'automatisation des tâches de calculs et de résolution d'équations est limitée dans toutes les directions. Cela n'empêche pas des progrès continus dans la programmation des calculs mathématiques et, au contraire, permet d'y être plus efficaces.

Le travail de ceux qui améliorent les logiciels de calcul formel présente un double visage : d'une part, identifier ce qui est impossible en prouvant des résultats comme ceux de Y. Matiyasevich et de D. Richardson, afin d'en déduire des objectifs raisonnables ; d'autre part, rechercher des bons algorithmes qui mèneront des calculs de plus en plus complexes, rapides et variés. Les équations insolubles sont au cœur des mathématiques depuis l'Antiquité. C'est en les maîtrisant et en les comprenant que, bien souvent, les mathématiques avancent. ■

L'AUTEUR

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

Le blog de Jean-Paul Delahaye sur *SciLogs.fr* : www.scilogs.fr/complexites/

BIBLIOGRAPHIE

E. Reiter, **Limits of Computation : An Introduction to the Undecidable and the Intractable**, CRC Press, 2013.

J. Koenigsmann, **Undecidability in number theory**, prépublication (http://arxiv.org/abs/1309.0441), 2013.

M. Suvakov et V. Dmitrasinovic, **Three classes of Newtonian three-body planar periodic orbits**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 110, 114301, 2013.

B. Poonen, **Undecidable problems : A sampler**, prépublication (arXiv:1204.0299), 2012.

C. Calude *et al.*, **Computing a glimpse of randomness**, *Experimental Mathematics*, vol. 11(3), pp. 361-370, 2002.

M. Henkel, **Sur la solution du problème des trois corps de Karl Sundman en 1909**, Philosophia Scientiae, vol. 5(2), pp. 161-184, 2001.

M. Petkovšek *et al.*, **A = B**, AK Peters, 1996.

Retrouvez la rubrique Logique & calcul sur www.pourlascience.fr

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

SCIENCE & FICTION

Les X-men, des mutants prometteurs

Capables de traverser des murs ou de manipuler des flammes, les X-men sont des humains dont l'ADN a subi des mutations. Est-il possible d'identifier la nature de ces mutations à la lumière des connaissances actuelles en génétique ?

Jean-Sébastien STEYER et Roland LEHOUCQ

L'avertissement adressé aux hommes par Kitty Pryde, *alias* Shadowcat, résume l'intrigue de l'univers des X-men : « Nous sommes des mutants. Nés différents des humains de base, avec un génome amélioré qui nous confère des superpouvoirs. Si vous nous énervez, c'est à vos risques et périls. »

Cette mutante capable de traverser la matière – tel le Passe-muraille de Marcel Aymé – et les autres X-men sont à nouveau à l'écran dans le film *X-men, Days of Future Past* de Bryan Singer. Cet épisode dépeint l'origine complexe du conflit entre les mutants qui croient que l'humanité peut les accepter et ceux qui ne le pensent pas et veulent l'exterminer. Mais qui sont ces étranges personnages et que nous apprennent-ils sur les mutations génétiques et la biologie de l'évolution ?

Imaginés par le scénariste Stan Lee et le dessinateur Jack Kirby, les X-men sont des personnages de bandes dessinées qui apparaissent pour la première fois en 1963 aux États-Unis, dans les pages de l'éditeur Marvel Comics, et en 1970 en France dans la revue *Strange*. Ces êtres présentent des mutations génétiques qui leur confèrent des pouvoirs comme l'invisibilité, la télépathie ou la télékinésie – ils sont capables de communiquer et de déplacer des objets par la pensée. Mais ces pouvoirs, qui s'expriment en général à partir de l'adolescence, peuvent vite devenir des malédictions s'ils ne sont pas maîtrisés. Le professeur Charles Xavier, mutant doté de pouvoirs psychiques, crée l'« École pour jeunes surdoués » qui enseigne aux mutants à se connaître, se contrôler et être capables de vivre en bonne intelligence avec les humains « normaux ».

© 20th Century Fox

1. LES X-MEN SONT DES MUTANTS dotés de différents superpouvoirs. Ce film retrace le conflit entre deux chefs mutants et raconte comment ces êtres sont acceptés ou rejetés par la société.

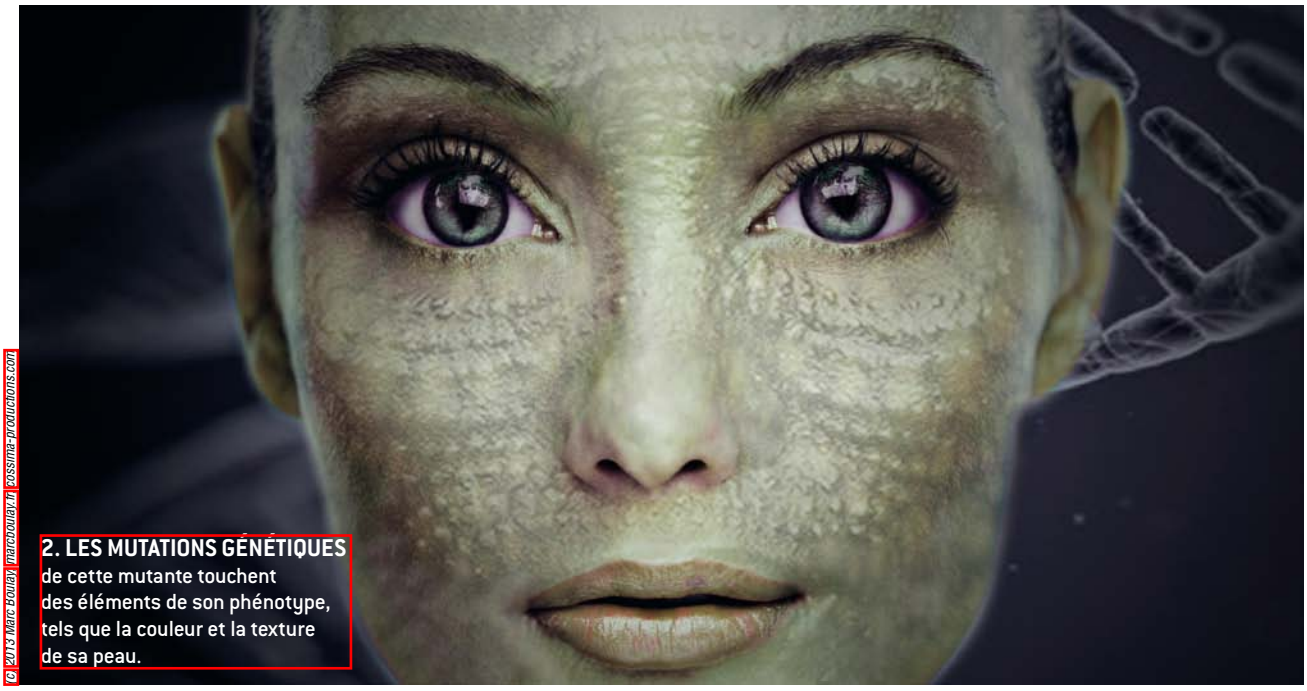
Mais les X-men sont sujets à des persécutions : ils sont espionnés, fichés et certains humains confondant mutation et maladie veulent même les vacciner, voire les exterminer. Leur histoire ressemble à celle du roman *À la poursuite des Slans* d'Alfred van Vogt (1940) qui met en scène des mutants télépathes pourchassés par les hommes. Dans les aventures des X-men, Magneto, le chef des mutants rebelles, est un rescapé des camps de concentration nazis.

Si ces histoires de mutants, aussi violentes soient-elles, font l'apologie du respect d'autrui et du droit à la différence, elles ne nous expliquent pas ce qu'est une mutation.

Quelle explication biologique ?

En biologie, un mutant est un organisme dont l'information génétique – sa séquence d'ADN ou d'ARN dans le cas de certains virus – a été modifiée. Il existe de nombreux types de mutations. Pour déterminer celles qui affectent les X-men, voyons d'abord comment ces mutants apparaissent. Les parents très ordinaires du jeune Saint-John Allerdyce (*alias* Pyro) sont sidérés lorsqu'ils le découvrent jouant avec le feu et capable de projeter à

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014



© 2013 Marc Boulay, marcboulay.fr, possima-productions.com

2. LES MUTATIONS GÉNÉTIQUES de cette mutante touchent des éléments de son phénotype, tels que la couleur et la texture de sa peau.

distance la flamme d'un briquet – un pouvoir nommé pyrokinésie. Le fait qu'un mutant puisse naître de parents « normaux » suggère donc qu'une modification génétique s'est produite soit dans le spermatozoïde fécondant ou l'ovule fécondé (la mutation est alors dite germinale ou *de novo*) soit dans l'œuf après la fécondation (la mutation est alors dite postzygotique). Chez l'enfant, les mutations germinales sont souvent à l'origine d'anomalies chromosomiques. Statistiquement, elles affectent plus les spermatozoïdes que les ovules, bien que le risque augmente avec l'âge de la mère.

Les mutations postzygotiques étant bien plus rares, les X-men sont plus probablement des mutants germinaux. Mais puisque leurs pouvoirs tendent à se manifester à l'adolescence, ils pourraient aussi être issus de mutations touchant leur propre ADN en cours de développement. Cependant, ces mutations sont transmises uniquement aux cellules filles de la cellule mutée et peuvent parfois produire des cellules tumorales, voire des cancers, ce qui n'est pas le cas des X-men.

Autre possibilité, leurs mutations sont conditionnelles. Elles sont toujours présentes, mais ne s'expriment qu'à certains moments, dans certaines conditions. C'est le cas des drosophiles mutantes sensibles aux variations de température. Dans le cas des X-men, nous pourrions imaginer des mutations conditionnelles s'exprimant à la suite d'un stress ou d'une poussée d'hormones de croissance.

Quel que soit le type de mutation, les X-men apparaissent sur toute la surface de la Terre. Leurs mutations semblent donc aléatoires, et non produites par des agents mutagènes spécifiques tels les rayonnements de haute énergie ou des produits chimiques. Ces mutations participeraient au « bruit de fond » de l'évolution, produisant parfois de nouvelles formes qui sont sélectionnées ou non. Même si la plupart sont imperceptibles, les mutations sont donc des moteurs de l'évolution et les X-men seraient un exemple du potentiel évolutif de l'espèce humaine. Mais contrairement à ce qu'affirme Kitty Pryde, le génome des X-men n'est pas amélioré par rapport à celui des hommes, il est juste différent.

Un saut évolutif

Dans l'univers Marvel, les X-men appartiennent d'ailleurs à l'espèce *Homo superior*. Cette dénomination rappelle certaines théories dépassées de « racisme scientifique » qui considéraient certains individus comme supérieurs aux autres, justifiant ainsi des atrocités, telles que l'esclavage ou la Shoah. Cette dérive n'est pas possible avec les X-men qui sont de diverses origines : par exemple, Épervier est apache tandis que Tornade est africaine. Mais ces mutations font-elles pour autant des X-men une espèce différente d'*Homo sapiens* ? Ce saut évolutif qui transforme une espèce en une autre le temps d'une génération est nommé saltation, et la mutation responsable une macromutation. Ce phénomène, observé chez des vers et des arthropodes, est si rare qu'il est parfois considéré comme un modèle évolutif hypothétique. Mais de récentes expériences sur des gènes architectes (participant à la morphogenèse du corps) ont montré que de petites modifications peuvent créer des mutants très différents de leurs parents, telle la drosophile *Antennapedia* qui porte une paire de pattes à la place des antennes !

Ces mutations rappellent la théorie des « monstres prometteurs » développée par l'embryologiste Richard Goldschmidt (1878-1958) selon laquelle les macromutations, certes rares, sont à l'origine de la spéciation tandis que les micromutations, plus nombreuses, ne produisent que des variations intraspécifiques. En 1935, l'embryologiste quitta son Allemagne natale, car il était juif ; en cela il rappelle un peu Magneto. Goldschmidt s'est réfugié aux États-Unis où il est devenu professeur d'université, comme Charles Xavier ! Goldschmidt nous enseigne donc que les X-men pourraient bien être des mutants prometteurs. ■

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

Retrouvez la rubrique Science & fiction sur www.pourlascience.fr

ART & SCIENCE

Alerte à la pollution en rouge et en vert

Comment connaître les pollutions des siècles passés ? En examinant les proportions de rouge et de vert des ciels peints par les grands maîtres, tel le Britannique William Turner.

Loïc MANGIN

En mars 2014, plusieurs alertes à la pollution, notamment en région parisienne, ont été lancées par l'Agence *Airparif*. En effet, les seuils tolérés de concentration en particules fines (des poussières que l'on distingue selon différentes catégories de diamètre) ont été dépassés à plusieurs reprises. Ces particules fines, ou aérosols, sont d'origine humaine ou naturelle : dans le premier cas, elles sont émises par les installations de chauffage, les transports, l'industrie… ; dans le second, elles émanent de feux de forêts, d'éruptions volcaniques, etc.

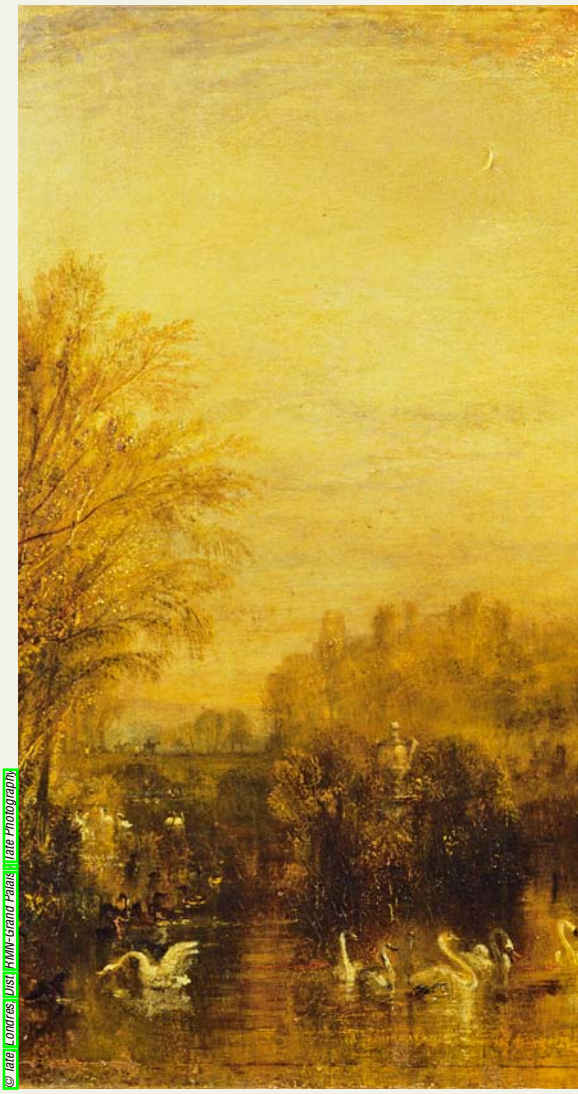
Les équipes d'*Airparif* utilisent divers instruments scientifiques pour leurs mesures *in situ*. Mais comment faire pour étudier les pollutions du passé, dont on pourrait tirer des enseignements ? Christos Zerefos, de l'Académie d'Athènes, en Grèce, a récemment proposé d'examiner les toiles des grands maîtres du paysage, au premier rang desquels le Britannique William Turner (1775-1851), surnommé le peintre de la lumière. Sa *Vue du lac de Petworth : rayons de soleil, un cerf buvant (voir l'illustration)* le démontre.

Avec ses collègues, Ch. Zerefos a peaufiné une méthode conçue en 2007 pour déterminer la quantité d'aérosols dans le ciel au moment où les œuvres ont été réalisées. Pour ce faire, les chercheurs ont calculé un indice, le ratio de rouge et de vert dans les représentations du ciel figurant sur 124 toiles conservées à la *Tate Gallery*, à Londres. Ce ratio reflète l'épaisseur optique de l'atmosphère, qui dépend de la quantité d'aérosols. La lumière du Soleil est filtrée par l'atmosphère qui favorise les grandes longueurs d'onde (le rouge) au détriment des courtes (le vert). Cet effet, accentué lorsque l'astre du jour est bas, par exemple au coucher, est d'autant plus important que la quantité d'aérosols est grande. Ainsi, le ratio de rouge et de vert est un indicateur de pollution.

Et c'est bien ce qui a été vérifié. Les toiles de Turner peintes peu de temps après l'éruption du volcan Tambora, en Indonésie, entre le 5 et le 10 avril 1815, sont plus riches en rouge que celles d'autres périodes. Lors de cet événement, des cendres ont été projetées à plus de 44 kilomètres d'altitude, d'où elles sont parties pour faire plusieurs fois le tour de la Terre. Les conséquences furent telles que l'on nomma l'été 1815 l'« été sans soleil », et l'année 1816 l'« année sans été ».

De même, certaines toiles du Français Edgar Degas (1834-1917) témoignent de l'éruption du volcan Krakatoa, lui aussi indonésien, les 26 et 27 août 1883.

La méthode du ratio de rouge et de vert renseigne bien sur le contenu en aérosols de l'atmosphère. Un autre pan de l'étude a consisté à regrouper des tableaux peints entre 1500 et 2000 par intervalles de 50 ans. Les années caractérisées par une éruption volcanique et les trois suivantes étaient écartées. On put alors calculer



© Tate, Londres, USI, RMN-Grand Palais (Tate Photography)

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

une moyenne des ratios de rouge et de vert pour chaque intervalle et en fin de compte obtenir des mesures continues pour cinq siècles. Les physiciens grecs n'ont pu alors que constater ce que d'autres techniques avaient montré par ailleurs : les émissions de particules n'ont cessé d'augmenter depuis le milieu du XIXe siècle jusqu'à la fin du XXe.

Pour vérifier le bien-fondé de la méthode, l'équipe de Ch. Zerefos a eu une idée originale. Elle a sollicité les services du peintre grec Panayiotis Tetsis et lui a demandé de représenter les couchers de soleil de plusieurs jours consécutifs, au mois de juin 2010, sur l'île d'Hydra, à environ 80 kilomètres au Sud d'Athènes. L'artiste ignorait qu'un nuage de sable du Sahara passait au-dessus de l'île (la trajectoire a été calculée à partir de modèles et d'observations satellitaires).

En mesurant d'une part les ratios de rouge et de vert dans les œuvres obtenues, et d'autre part le contenu de l'atmosphère par des méthodes radiométriques, les chercheurs ont pu corroborer leur hypothèse fondée sur les toiles du XIXe siècle. Le ciel est bien plus riche en rouge en présence de poussières qu'en leur absence. Certes, le sable n'est pas constitué de cendres volcaniques, mais son effet sur la lumière solaire est similaire.

Le grand nombre de peintures prises en compte, et ce quelle que soit l'école artistique dont pouvait se revendiquer l'artiste, plaide pour la robustesse de la méthode. Elle vient donc s'ajouter à l'arsenal dont les climatologues disposent pour reconstituer les climats du passé. Elle a même un avantage, par exemple, sur l'étude des carottes de glaces : elle est beaucoup plus confortable puisqu'elle consiste à aller au musée ! ■

Ch. Zerefos *et al.*, **Further evidence of important environmental information content in red-to-green ratios as depicted in paintings by great masters,** *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 14, pp. 2987-3015, 2014.

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

IDÉES DE PHYSIQUE

Les éoliennes verticales

Contrairement aux éoliennes à hélices classiques, celles dotées d'un axe vertical peuvent tourner quelle que soit la direction du vent.

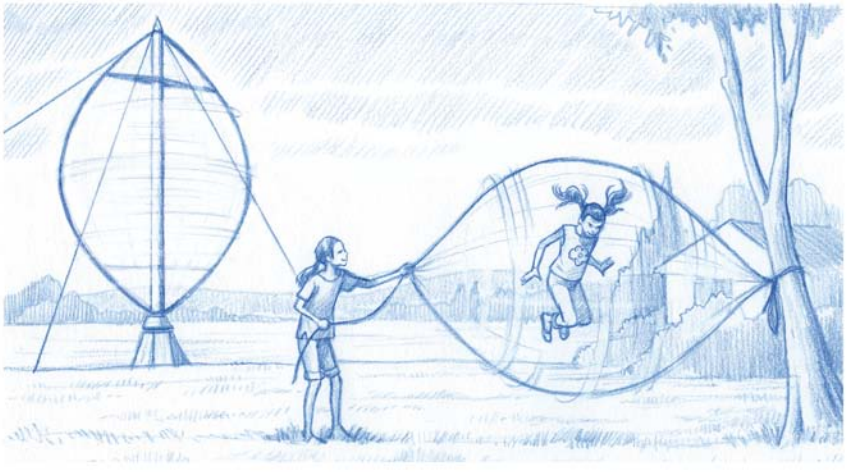
Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Nous sommes aujourd'hui familiers des gigantesques éoliennes installées à proximité des autoroutes ou sur les crêtes, avec leurs pales en hélice tournant autour d'un axe horizontal. Nous en oublions que des éoliennes d'un autre type, à axe vertical cette fois, offrent une alternative lorsque la direction du vent est incertaine ou perturbée, comme c'est souvent le cas dans un environnement urbain. Examinons ces éoliennes aux noms exotiques, Darrieus ou Savonius, pour comprendre comment elles fonctionnent et pourquoi, malgré des rendements énergétiques bien inférieurs aux éoliennes classiques, elles suscitent un intérêt constant.

En ralentissant le vent, une éolienne transforme l'énergie cinétique de ce dernier en énergie électrique. Dans le modèle le plus répandu, le dispositif mécanique qui entraîne le générateur électrique est une hélice fixée sur un rotor horizontal, placé en hauteur pour bénéficier de vents plus forts et plus réguliers qu'au niveau du sol.

Ces dispositifs récupèrent près de 50 pour cent de l'énergie du vent qui les traverse. Une valeur proche de l'optimum théorique de 60 pour cent, qui est le fruit d'un compromis. En effet, pour récupérer un maximum de puissance, il faut ralentir fortement le vent, mais pas trop car le débit d'air et, partant, la puissance disponible diminuent aussi.

Les éoliennes à hélice constituent l'essentiel du parc éolien de production d'électricité, notamment pour les éoliennes de grande puissance, dans la gamme du mégawatt. Leur usage n'est toutefois pas adapté à toutes les situations. L'entretien de la machinerie, en hauteur, est délicat. Elles doivent être orientées face au vent, à l'aide d'un moteur, et on préfère ne pas changer leur orientation trop souvent ; ainsi, en présence d'un vent de direction variable, on choisit d'orienter selon différentes directions les éoliennes d'un même parc, quitte à stopper les éoliennes mal orientées.



1. UNE ÉOLIENNE DARRIEUS utilise des pales dont la section transversale dessine une aile d'avion et qui ont la forme d'une troposkine – la courbe adoptée par une corde souple en rotation rapide. Cette forme réduit au maximum les contraintes mécaniques qui s'exercent sur la pale.

Inventées vers 1930

Les éoliennes à axe vertical, brevetées l'une en 1927 par l'ingénieur et académicien français Georges Darrieus et l'autre en 1929 par l'ingénieur finlandais Sigurd Savonius, ne présentent pas ces inconvénients.

L'éolienne Savonius est la plus simple à comprendre. Le dispositif est formé de deux godets cylindriques légèrement désaxés *(voir la figure 3)*. Le vent pousse au creux du premier godet en s'y engouffrant et poursuit sa course dans le second godet qu'il pousse également avant d'en sortir. Puisque les godets sont décalés, le vent peut toujours s'y engouffrer et provoquer la mise en rotation, quelle que soit l'orientation du dispositif. C'est sur ce principe que fonctionnent les anémomètres ou les ventilateurs Flettner installés sur le toit de certains véhicules.

Jouant exclusivement sur une force de traînée, l'éolienne Savonius a l'avantage d'engendrer un fort couple et de vite démarrer, même avec un vent faible. Le rendement, de l'ordre de dix pour cent, est toutefois très mauvais.

Pour obtenir de meilleurs rendements, mieux vaut faire appel à des forces de portance

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

plutôt qu'à une force de traînée. C'est ce que fait l'éolienne Darrieus *(voir les figures 1 et 2)*. L'astuce est de disposer des pales profilées comme des ailes d'avion autour du rotor. Les forces qui s'exercent sur ces pales sont dues au vent apparent qu'elles subissent, et qui est la somme (vectorielle) du vent réel et du vent dû à la rotation du dispositif.

Lors de la rotation du dispositif, l'orientation de la pale varie ; il en est donc de même du vent apparent, en module et en direction. Il en résulte une force aérodynamique périodique. À chaque instant, cette force est la somme d'une force de traînée, dirigée selon le vent apparent (le frottement s'oppose au mouvement), et d'une force de portance, perpendiculaire au vent apparent (force due à la déviation de ce dernier par la pale).

Lorsque le vent est perpendiculaire à la pale, le vent apparent est orienté de biais et il en résulte une force de portance dont le couple accélère la rotation, tandis que la force de traînée la ralentit. Si la rotation est assez rapide, l'angle d'incidence du vent apparent devient assez petit et la force de portance est alors bien supérieure à la force de traînée, d'où un couple total qui accélère la rotation.

Mais quand le vent est face à la pale, le vent apparent l'est aussi et seule subsiste la traînée, qui ralentit la pale. Pour estimer les performances globales, on doit effectuer une moyenne des couples exercés par la portance et la traînée sur toute la circonférence. D'expérience, on constate qu'avec un profil de pale adapté, le couple moyen est effectivement moteur. Un vent rotatif de l'ordre de quatre à six fois le vent réel permet d'atteindre les meilleurs rendements énergétiques (40 pour cent au maximum).

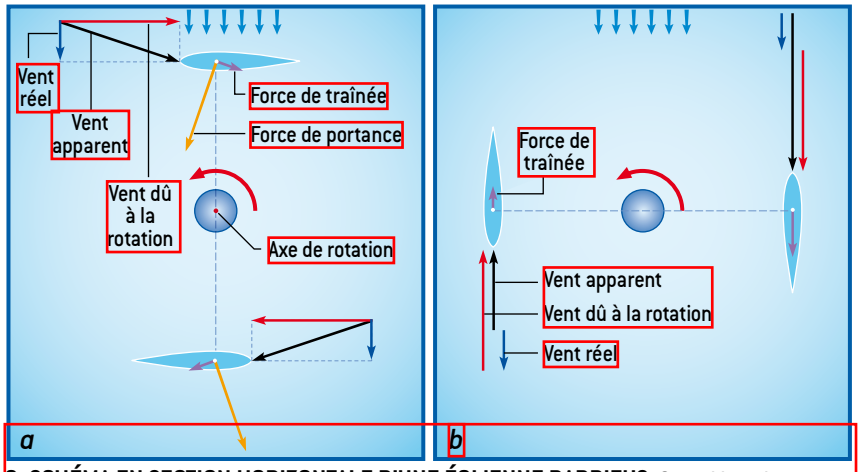
Ces effets disparaissent à faible vitesse de rotation ou à l'arrêt : une éolienne Darrieus à une ou deux pales s'immobilise en position de vent perpendiculaire, sans pouvoir démarrer toute seule. On n'obtient un démarrage autonome et laborieux, quelle que soit la position initiale, qu'avec trois pales écartées de 120 degrés. C'est pourquoi le générateur de l'éolienne est parfois utilisé comme moteur pour la démarrer. Une autre solution est de combiner sur un même axe un dispositif de Savonius, autorisant le démarrage autonome, à une éolienne Darrieus, qui prend le relais dès que la rotation est assez rapide et qui offre à l'ensemble un bon rendement *(voir la figure 3)*.

Une forme singulière

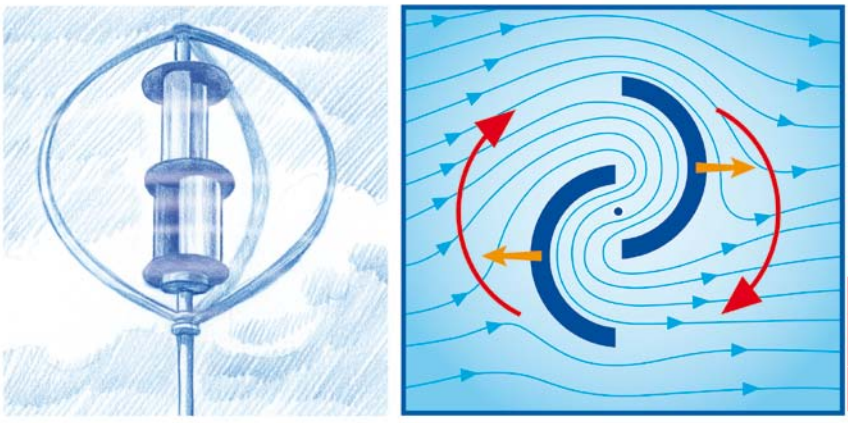
La nécessité d'une vitesse de rotation importante pour un bon rendement a une conséquence mécanique inattendue. Imaginons qu'une éolienne Darrieus de 5 mètres de diamètre tourne dans un vent de 10 mètres par seconde. Au meilleur de son rendement, le point extrême de la pale tourne à environ

LES AUTEURS

Jean-Michel COURTY
et Édouard KIERLIK
sont professeurs de physique
à l'Université Pierre
et Marie Curie, à Paris.
Leur blog : http://blog.idphys.fr



2. SCHÉMA EN SECTION HORIZONTALE D'UNE ÉOLIENNE DARRIEUS. Quand la pale est perpendiculaire au vent *(a)*, la force de portance accélère la rotation, malgré la force de traînée. Lorsque la pale est alignée avec le vent *(b)*, ne subsistent que les forces de traînée.



Dessins de Bruno Vacaro

3. UNE ÉOLIENNE MIXTE DARRIEUS-SAVONIUS. Aux pales de type Darrieus s'ajoutent deux dispositifs formés chacun de deux godets cylindriques décentrés et se faisant face. Le vent, en s'engouffrant entre les deux godets, crée un couple de forces *(en orange)* qui fait tourner le dispositif autour de son axe. Les deux dispositifs sont orientés à 90 degrés l'un de l'autre pour que le vent agisse quelle que soit sa direction.

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

BIBLIOGRAPHIE

R. Dominy *et al.*, **Self-starting capability of a Darrieus turbine**, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A : Journal of Power and Energy*, vol. 221(1), pp. 111-120, 2007.

T. D. Ashwill et T. M. Leonard, **Developments in blade shape design for a Darrieus vertical axis wind turbine**, *Sandia Report SAND86-1085*, septembre 1986.

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

50 mètres par seconde, ce qui correspond à une accélération centripète de 1 000 mètres par seconde carrée, soit 100 fois l'accélération de la pesanteur !

Si aucune précaution n'est prise lors de sa conception, les forces centrifuges engendrées risquent de fatiguer mécaniquement la pale, voire de la casser. Plutôt que de renforcer la structure, il est plus simple d'utiliser une pale courbe. La forme optimale est la troposkine – celle que prend naturellement une corde souple en rotation constante autour d'un axe où sont attachées ses extrémités.

En effet, si l'accélération de la pesanteur est négligeable par rapport à l'accélération centripète, ce qui est le cas ici, cette forme est indépendante de la vitesse de rotation. Elle garantit que les efforts mécaniques s'exercent le long de la pale uniquement en traction et sont ainsi plus aisément supportables. Toutefois, le vent relatif dépend de la distance à l'axe et n'est donc pas uniforme le long de la pale. Il en résulte des turbulences aériennes qui peuvent se révéler bruyantes à haute vitesse et abaisser le rendement.

Même avec des dispositifs rigidifiés de pales rectilignes verticales, la variation au cours du temps du couple de portance engendre des vibrations gênantes au sein de la structure dès qu'elle est de grande taille… Pour l'instant, il semble que la technique Darrieus-Savonius ne soit attractive que pour des éoliennes de petite taille, à disposer sur les toits ou le long des routes dans des vents modérés. Dans cette niche plus restreinte, l'espoir est permis. Ainsi, la société chinoise *Timar* commercialise des réverbères hybrides vent/solaire autonomes, qui portent en leur sommet une éolienne du type précité de 400 watts ! ■

Toutes les ARCHIVES

- Pour la Science
- Dossier Pour la Science

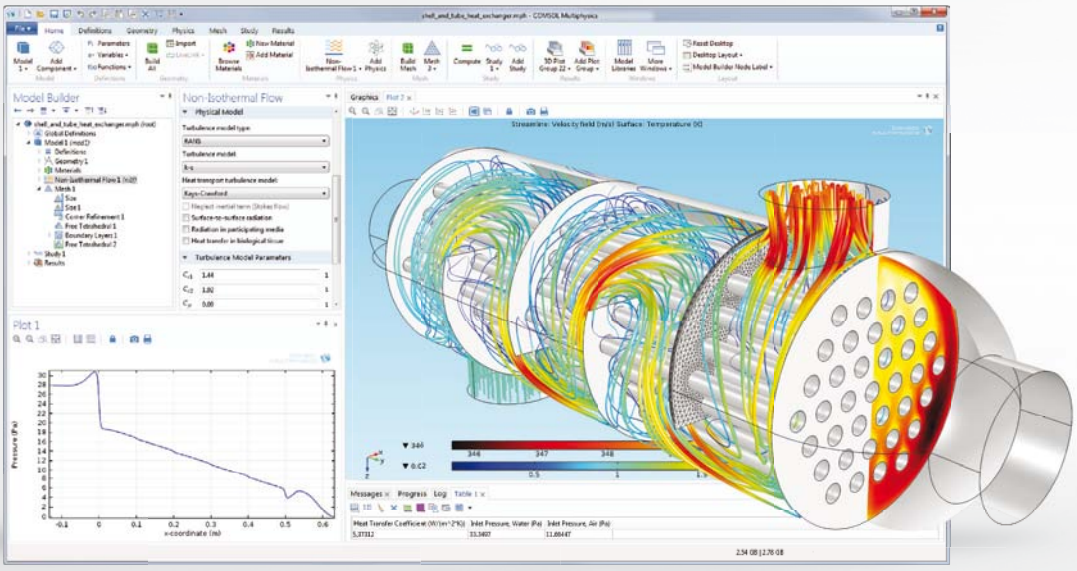
depuis 1996

maintenant disponibles sur www.pourlascience.fr *

* Numéros à lire en ligne ou téléchargeables en PDF, en vente à l'unité ou accessibles par abonnement.

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

ECHANGEUR DE CHALEUR: Modèle d'échangeur tube calandre permettant l'échange de chaleur entre eau (tube) et air (calandre).



TESTEZ ET OPTIMISEZ VOS DESIGNS AVEC

COMSOL MULTIPHYSICS®

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

Product Suite

COMSOL Multiphysics

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

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

MULTIPURPOSE
Optimization Module
Material Library
Particle Tracing Module

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

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

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

COMSOL

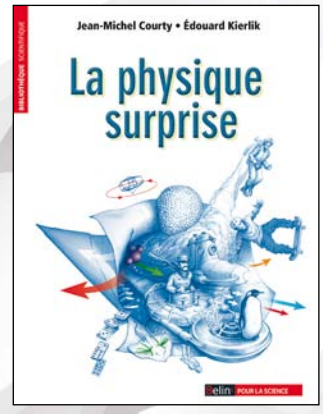
© Copyright 2013–2014 COMSOL. COMSOL, COMSOL Multiphysics, Capture the Concept, COMSOL Desktop, and LiveLink are either registered trademarks or trademarks of COMSOL AB. All other trademarks are the property of their respective owners, and COMSOL AB and its subsidiaries and products are not affiliated with, endorsed by, sponsored by, or supported by those trademark owners. For a list of such trademark owners, see www.comsol.com/trademarks

La librairie POUR LA SCIENCE

Le savoir scientifique au fil des pages

La physique surprise

Réf. 84245121



Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

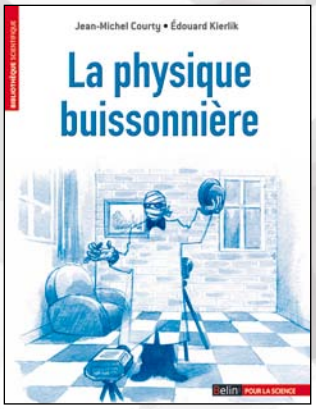
Passionnés de physique et curieux de tout, Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik vous invitent à une nouvelle promenade sur des chemins de traverse dans un langage accessible, simple et imagé, sans jargon ni formules. Avec eux, laissez-vous surprendre par les phénomènes physiques que vous avez déjà côtoyés sans même les remarquer !

Éditions Belin / Pour la Science
184 pages – 24 euros – ISBN 978-2-8424-5121-9

La physique buissonnière

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

Réf. 84245105



Une plante plus rapide qu'une mouche, un tuyau qui parle, une cape qui rend invisible, etc. La nature est pleine de surprises pour qui veut bien s'aventurer hors des sentiers battus. Passionnés de physique, les auteurs vous invitent à une promenade sur des chemins de traverse pour comprendre cette physique du quotidien.

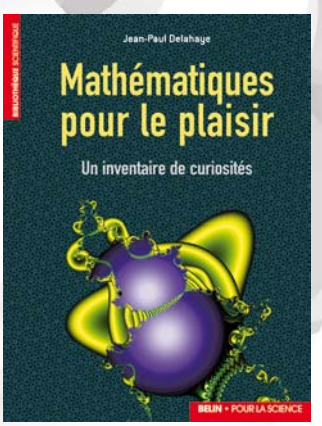
Éditions Belin/Pour la Science 2009
160 pages – 22,35 euros – ISBN 978-2-8424-5105-9

Mathématiques pour le plaisir

Un inventaire de curiosités

Jean-Paul Delahaye

Réf. 84245104



Arts et mathématiques, géométries amusantes, jeux, nombres, casse-tête et énigmes... Les mathématiques sont une source de joie et d'épanouissement pour celui qui sait y consacrer un peu d'attention et d'esprit ludique !

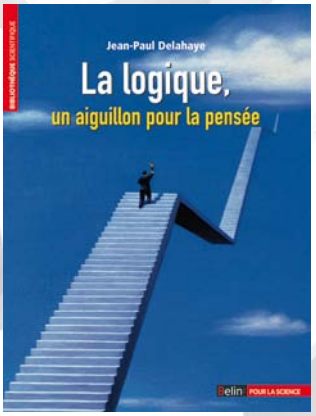
Éditions Belin / Pour la Science 2010
208 pages – 25,40 euros
ISBN 978-2-8424-5104-2

La logique,

un aiguillon pour la pensée

Jean-Paul Delahaye

Réf. 84245115



La logique a connu d'incroyables progrès depuis deux siècles : l'incomplétude de Gödel et l'indécidabilité de Turing ; la troublante loi de Benford ; les étranges hyper-ensembles, etc. Cet ouvrage sur la logique moderne des sciences intéressera autant mathématiciens que philosophes et curieux intrigués par le monde abstrait des raisonnements.

Éditions Belin / Pour la Science
200 pages – 27 euros – ISBN 978-2-8424-5115-8

Pour commander ces ouvrages, notez leur référence et rendez-vous pages 68-69

QUESTION AUX EXPERTS

Sommes-nous commandés par des phéromones ?

Non. Chez l'homme, certaines substances semblent influer sur l'humeur, mais sans déterminer des comportements stéréotypés comme chez les autres animaux.

© Lyyshunterstock.com

Didier TROTIER

Aux dires des vendeurs, nombre de parfums contiennent des substances chimiques irrésistiblement attirantes pour le sexe opposé – des phéromones. De fait, dans le monde animal, les phéromones sont omniprésentes et jouent un rôle majeur. Est-ce aussi le cas chez l'homme ?

Les phéromones sont des messagers chimiques qui peuvent déclencher deux types de réactions chez un congénère : soit un comportement stéréotypé, tels la fuite ou l'accouplement, soit une modification physiologique à long terme, qui module le comportement sexuel. Ainsi, chez de nombreuses espèces, les phéromones d'un mâle dominant réduisent les aptitudes sexuelles des autres mâles, en provoquant chez eux divers changements hormonaux. Ces messagers chimiques permettent donc de maintenir les rapports de dominance, de signaler un danger, ou de rencontrer l'autre sexe et de jauger son potentiel reproducteur.

Des études chez les rongeurs ont montré que les phéromones comprennent de petites molécules volatiles, mais aussi de nombreuses autres substances, tels des stéroïdes, des peptides et de grosses protéines. Elles sont détectées par les neurones olfactifs ou par ceux d'un organe spécifique, dit voméronasal. Ces deux types de neurones, situés dans le nez, émettent alors des influx nerveux qui modulent l'activité de diverses structures cérébrales.

Chez l'homme, l'organe voméronasal se développe durant la vie fœtale, mais il s'atrophie vers la fin de la période embryonnaire. En outre, il n'est pas fonctionnel, car il ne contient pas de neurones détecteurs. Les phéromones humaines, si elles existent, seraient donc détectées par la voie olfactive ou auraient un effet sur le cerveau *via* la circulation sanguine (par exemple après imprégnation de la muqueuse nasale).

Des candidats, aucun élu

Certains stéroïdes présents dans la sueur humaine sont soupçonnés d'être des phéromones. Cependant, les tests en laboratoire n'ont mis en évidence ni comportement stéréotypé ni effet neuro-endocrinien mesurable. Les effets observés semblent plutôt d'ordre psychologique. Ils incluent par exemple un changement d'humeur ou une modulation de l'attention. En outre, ces effets dépendent notablement du contexte et aucune étude n'a révélé d'excitation sexuelle particulière.

Parmi ces substances, citons l'androstadiénone et l'androsténone. La première est un dérivé de la testostérone présent dans la sueur des aisselles, surtout chez les hommes (elle y est jusqu'à 20 fois plus abondante que chez les femmes). Son inhalation active l'hypothalamus (une aire cérébrale impliquée dans le contrôle de la sécrétion des hormones sexuelles) chez les femmes hétérosexuelles, mais pas chez les hommes hétérosexuels. Pour ces derniers, l'hypothalamus est activé par une substance similaire aux estrogènes. Chez les homosexuels (hommes ou femmes), les activations cérébrales ressemblent à celles des hétérosexuels du sexe opposé.

Toutefois, on n'a jusqu'ici identifié aucune modification physiologique accompagnant ces activités cérébrales. L'androstadiénone semble améliorer l'humeur de la femme en présence d'un homme (sans excitation sexuelle particulière) ; elle a donc un effet indirect sur le comportement, mais qui est loin d'être aussi stéréotypé que chez les autres animaux. Remarquons à ce propos qu'une odeur agréable, sans lien avec une phéromone, peut aussi améliorer l'humeur...

L'androsténone, présente dans la sueur et l'urine de nombreux mammifères, a aussi fait l'objet de quelques travaux. Son rôle de phéromone sexuelle est reconnu chez le cochon. Une fonction similaire n'a pu être montrée chez l'homme, bien que l'on ait observé une activation cérébrale.

La sexualité humaine implique une telle diversité de processus physiologiques, psychologiques et cognitifs qu'elle semble assez peu influencée par des substances de type phéromones. Déconnectée de la reproduction, elle n'est plus déterminée par un mécanisme chimique assurant la rencontre avec l'autre sexe et ainsi la perpétuation de l'espèce. ■

Didier TROTIER est chercheur du CNRS à l'Institut de neurobiologie Alfred Fessard (Gif-sur-Yvette).

L'information scientifique de référence **maintenant sur tablette et smartphone !**

Téléchargez gratuitement
l'application sur App Store et Google Play.
et feuilletez gratuitement le numéro en cours.

Disponible sur App Store

DISPONIBLE SUR Google play

Flashez ce QR code avec votre mobile ou votre tablette pour télécharger immédiatement l'application.

Avec l'application « Pour la Science », retrouvez dès leur sortie le mensuel *Pour la Science* à 4,49 € et son trimestriel *Dossier Pour la Science* à 5,49 € en version numérique optimisée pour tablette : lecture intuitive, sommaire interactif, contenus enrichis, feuilletage hors connexion, etc.

&

Découvrez aussi l'application « Cerveau & Psycho » pour retrouver le magazine *Cerveau & Psycho* et son trimestriel *L'Essentiel Cerveau & Psycho*

SCIENCE & GASTRONOMIE

Éliminer l'odeur d'ail de l'haleine

Certains aliments, tels que les pommes ou le persil, atténuent l'odeur chargée de l'haleine après la consommation d'ail.

Hervé THIS

© Jean-Michel Tinna

Les alliacés donnent à l'haleine une odeur puissante. Des produits ont été conseillés pour l'éliminer : graines de cardamome en Inde, thé vert en Chine, persil, épinards ou pommes chez nous. Que valent ces propositions ?

Quand on broie de l'ail, l'un de ses composés, l'alliine, est modifié en acide allysulfénique par une enzyme de l'ail, l'alliinase. L'acide allylsufénique est alors transformé en allicine, qui conduit à la formation de trois composés volatils. Un quatrième composé, le sulfure de méthyle-allyle, se forme dans l'organisme ayant ingéré de l'ail : métabolisé plus lentement que les autres composés, il est le principal incriminé dans l'odeur.

Les études de la désodorisation de l'haleine ont été nombreuses, souvent *in vitro*, avec des mesures de l'air surmontant une préparation ou des analyses sensorielles. Les premières sont insuffisantes, étant donné le métabolisme du sulfure de méthyle-allyle, et les secondes ne donnent pas d'indication claire sur les mécanismes mis en jeu. De fait, les hypothèses couraient : les chlorophylles auraient-elles une action ? Des enzymes ?

Ryan Munch et Sheryl Barringer, de l'Université de l'Ohio, ont repris la question en analysant dans l'haleine, par des techniques chromatographiques, l'effet de la chlorophylline, de la pomme, du persil, des épinards, de la menthe, du thé vert, du jus de citron…

Les participants aux expériences consommaient une tranche de pain tartinée de pâte d'ail (des gousses broyées dans un peu d'eau) ; puis on enregistrait la composition de leur haleine à des temps précis, avant et après la consommation de 10 à 100 grammes de produit potentiellement désodorisant : persil, thé vert, jus de citron, pomme crue ou cuite, épinard…

Les chimistes ont testé leur méthode analytique en vérifiant que, sans désodorisation particulière, les concentrations en composés soufrés sont supérieures aux seuils de perception. Ils ont constaté une forte décroissance de ces concentrations lors des deux premières minutes après l'ingestion d'ail, avant une décroissance lente durant la demi-heure qui suit. En revanche, la concentration en sulfure de méthyle-allyle, qui se forme dans l'organisme, augmente jusqu'à un maximum après cinq à dix minutes, puis diminue pendant les 50 minutes suivantes ; c'est lui qui prédomine dans l'haleine, même trois heures après la consommation.

Par des études sensorielles sur des êtres humains et sur des chiens, on avait déterminé que des aliments contenant de la chlorophylle pouvaient désodoriser partiellement l'haleine, et les tests avec épinards, persil ou menthe l'ont confirmé. En revanche, l'utilisation de chlorophylline (un dérivé hydrosoluble des chlorophylles) n'a pas montré d'effet. Il fallait donc rechercher un autre composé présent dans les mêmes tissus végétaux.

Des enzymes polyphénoloxydases ayant montré des effets *in vitro*, verrait-on des différences entre des pommes crues, où ces enzymes sont actives (elles font brunir les pommes quand on les coupe), et des pommes cuites, où les enzymes sont inactivées ? Les pommes crues désodorisent bien plus que les pommes cuites, de sorte que l'hypothèse enzymatique, qui vaut aussi pour les tissus végétaux contenant des chlorophylles, doit être retenue.

Par ailleurs, ces enzymes sont souvent en compagnie de composés phénoliques dans les végétaux, et notamment dans le thé vert ou le jus de citron, qui ont des effets désodorisants. Le jus de citron contient ainsi 93 microgrammes d'acide chlorogénique par gramme, composé phénolique également présent dans le thé vert. Son effet est notable.

Finalement, les chimistes ont établi que la désodorisation enzymatique est plus efficace que la désodorisation par les polyphénols… mais on peut associer les deux traitements. Hélas, la désodorisation, si elle est en progrès, n'est pas complète : les amateurs d'ail conserveront la marque de leurs préférences alimentaires ! ■

Hervé THIS est chimiste dans le Groupe INRA de gastronomie moléculaire, professeur à AgroParisTech et directeur scientifique de la Fondation Science & culture alimentaire (Académie des sciences).

Retrouvez la rubrique Science & Gastronomie sur www.pourlascience.fr

■ ANTHROPOLOGIE SOCIALE

L'amazone et la cuisinière

Alain Testart

Gallimard, 2014
(192 pages, 17,90 euros).

Les femmes ont toujours travaillé. Un grand nombre d'activités leur sont en outre spécifiques, tandis qu'au contraire d'autres sont presque entièrement le fait des hommes. C'est l'existence de cette division sexuelle du travail, quasi universelle et constante jusque dans les temps présents, qu'Alain Testart (1945-2013) tente d'expliquer dans ce petit ouvrage posthume. Les idées qui y sont exposées ne sont pas nouvelles, car Testart les avaient déjà développées en grande partie dans ses travaux antérieurs, mais elles sont présentées ici de façon très abordable pour le lecteur peu familiarisé avec les sciences sociales.

Testart commence par rejeter les explications naturalistes qui ont été avancées pour expliquer la division sexuelle du travail. Il en propose une de nature avant tout symbolique et la développe. Prenant pour point de départ les interdits et les croyances relatifs à la chasse, il va au fil des chapitres élargir la démonstration à d'autres activités, puis à d'autres substances que le sang pour déboucher sur une règle générale : la femme étant sujette à de graves perturbations en son intérieur, elle ne peut perturber de façon brusque l'intérieur des corps qu'elle travaille, et donc ne saurait utiliser des outils tranchants ou perforants en percussion lancée. Les croyances ne sont toutefois pas les seules à guider la division sexuelle du travail : elles interagissent avec d'autres facteurs, tels l'environnement, les progrès techniques, les contraintes économiques, l'équilibre général des tâches ou la subordination générale de la femme, expliquant ainsi les adaptations d'une société à une autre. Testart termine son essai en proposant quelques réflexions sur le pourquoi de ces croyances universelles. Appartenant à un complexe qui amène à éviter la conjonction de ce qui est semblable au moins symboliquement, elles seraient nées avec lui dans la Préhistoire à partir des interdits touchant l'inceste et l'endogamie.

En ces jours où la mode est à la parité et où la fameuse « théorie du genre » nourrit les débats, l'analyse que nous livre Testart permet d'aborder les choses sous un angle différent et passionnant. Sa lecture ne peut que convaincre qu'il existe bel et bien depuis la Préhistoire un système de croyances universel fondant la division sexuelle du travail. Une publication est d'ailleurs tout récemment venue confirmer que dès le Paléolithique supérieur au moins, le geste du lancer était spécifiquement masculin. Une belle illustration, s'il en faut, des mots de Machiavel : « Pour prévoir l'avenir, il faut connaître le passé, car les événements de ce monde ont en tout temps des liens aux temps qui les ont précédés. »

Bruno Boulestin
Université de Bordeaux

■ MATHÉMATIQUES

Récréations mathématiques au Moyen Âge

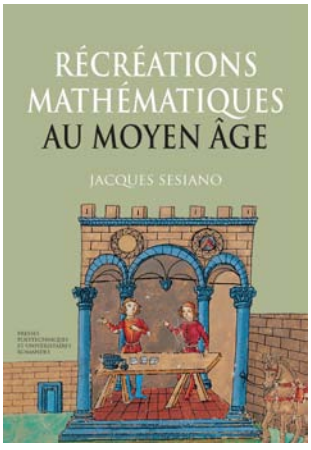
Jacques Sesiano

Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2014
(290 pages, 46 euros).

Depuis Michelet qui le détestait, le Moyen Âge nous apparaît comme un brouillard d'idées, un brouillard de casuistique, bref, un brouillard acculturant. Il semble au contraire que l'on puisse s'intéresser vraiment à ces 1000 ans qui ont été un temps de réflexion fertile.

Analysant soigneusement les textes, J. Sesiano restitue les mathématiques du Moyen Âge pour le plus grand bonheur du lecteur. Nombre de problèmes du grand Alcuin (730-804), commensal de Charlemagne qui fut « le plus grand savant de son temps », seront repris par Bachet de Méziriac (1581-1638) dans sa compilation de « Problèmes plaisants et délectables qui se font par les nombres », écrite en français moderne. Les textes d'Alcuin sont en français moyen, compréhensible avec un certain effort, comme vous le verrez grâce aux citations du livre. Ces problèmes de pesées, de transvasements, de distribution de biens à l'occasion d'héritage, de poursuites ne sont pas difficiles et seront une base notable des livres de divertissements mathématiques ultérieurs.

Les grands nombres méritent une mention spéciale. Le récit légendaire des grains dont le nombre double d'une case de l'échiquier à la suivante nous vient des Arabes. Le problème est exprimé clairement par l'astronome Al-Khasinï (XII^{e} siècle), mais il est probablement antérieur au X^{e} siècle et l'Italien Fibonacci en explorera des variantes. Incidemment, nous trouvons la réponse à un problème qui nous a fascinés depuis nos lectures de récits de pirates : combien y a-t-il de pièces de monnaie dans un coffre plein ? Autant qu'il y a de grains de blé jusqu'à la case de l'extrémité de la deuxième ligne de l'échiquier incluse, soit $2^{16} - 1 = 65\,535$ pièces. En poursuivant la duplication, des coffres cette fois,



vous lirez qu'une maison comporte ce même nombre de coffres, 65 535, soit un nombre de pièces déterminé par la case de la fin de la quatrième ligne, et qu'une grande ville a ce nombre de maisons, soit le nombre de pièces de monnaie associé à la dernière case de la sixième ligne.

Ces grands nombres étonnent : le fait qu'ils soient illustrés par les cases de l'échiquier indique la popularité des problèmes dont ils donnent la solution ; par ailleurs, nous imaginons mal leur notation en chiffres romains… Dans ce souci typiquement médiéval de rattachement à des notions concrètes, Al-Khasinï calcule le poids en or de la Terre, poids énorme, mais pour lui quand même insuffisant pour racheter les fautes des infidèles.

C'est par de tels petits problèmes que les vocations de mathématiciens se créent et qu'ont émergé certaines portions des mathématiques.

Philippe Boulanger

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

■ PROSPECTIVE

Poulpe fiction

A. Guillot et J.-A. Meyer

Dunod, 2014
(240 pages, 19 euros).

Pendant longtemps, la nature n'a été, pour reprendre l'expression de l'écrivain Patrick Deville, qu'un ennemi implacable qu'il fallait vaincre. Elle est devenue aujourd'hui, alors même qu'elle est si mal en point, une source infinie d'inspirations scientifiques et techniques. C'est ce que raconte ce livre où sont présentées domaine par domaine (la marche, le vol, la nage…) les réalisations techniques bio-inspirées (on s'inspire de la nature pour réaliser un dispositif) ou biomimétiques (on reproduit un dispositif de la nature).

Tout cela produit une grande fascination pour l'univers des possibles ouverts par ces approches, ce qui fait de ce livre un hymne à la nature et à l'intelligence humaine. Pour autant, il porte bien son nom : tout ce qui y est présenté y est plus ou moins fictif. Pourquoi ? Il aurait été intéressant que les auteurs sortent de leur attitude prospective pour affronter cette question. Pourquoi ressort-il si peu de réalisations grand public de cet extraordinaire fourmillement de systèmes passés à travers le redoutable filtre de la sélection naturelle ? Alors que la bio-inspiration n'est plus une approche neuve, elle compte bien peu de réalisations concrètes. À quelques exceptions près, comme le *Velcro*, dont il n'est d'ailleurs pas question ici, on ne voit que prototypes qui pourraient, qui devraient, qui permettraient… mais qui aujourd'hui ne sortent pas des laboratoires.

Où est le problème ? Les structures naturelles ont ceci de différent des structures artificielles qu'elles assurent le plus souvent plusieurs fonctions à la fois, tout en économisant les éléments chimiques nécessaires – ainsi ces ailes de papillons qui brillent et signalent tout en servant à voler… Or, constate-t-on à la lecture de ce livre, les belles réalisations inspirées ou imitées de la nature présentées dans cet ouvrage le sont aussi à grand renfort de très hautes technologies, fort peu naturelles finalement.

Par ailleurs, notons-le, la nature fait vendre, de sorte que, par exemple, l'on ne compte plus le nombre d'inventions soi-disant inspirées du morpho, ce papillon bleu iridescent, que ce soit en cosmétique, affichage, textile… Là encore, la nature inspire surtout une recherche d'effets visuels, qui n'ont que peu de choses à voir avec la structure réelle de l'aile du morpho.

Au bout du compte, un livre qui fascinera les férus de robotique et autres drones. Il pourra également inciter les futurs chercheurs à comprendre que la nature est un réservoir de solutions techniques, qui sont en fait bien plus difficiles à imiter qu'il ne semble au premier abord.

Serge Berthier
Université Paris Diderot

■ PHILOSOPHIE DES SCIENCES

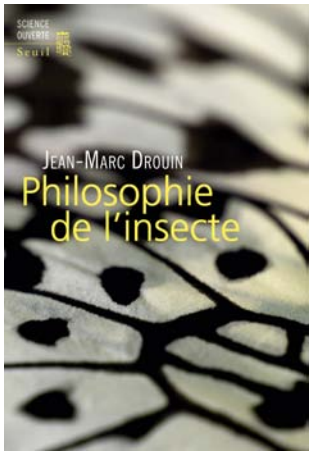
Philosophie de l'insecte

Jean-Marc Drouin

Seuil, 2014
(19,50 pages, 250 euros).

Cet ouvrage est construit autour d'une question passionnante : le philosophe peut-il penser le vivant sans considérer les insectes ? Comme l'auteur le souligne fort justement, les arthropodes, en raison de leur nature même, obligent à renouveler complètement l'éventail des questions posées.

L'auteur examine ainsi la petitesse des insectes et ses multiples conséquences, très mal perçues par la plupart des gens. Ainsi, il est fréquent de lire ou d'entendre que si une puce avait la taille de l'être humain, elle pourrait sauter la tour Eiffel. En réalité, il n'en n'est rien, car le changement de



taille détermine un changement d'échelle des phénomènes physiques qui limiterait de façon considérable le saut de cette puce géante : elle aurait certes une taille multipliée par mille et verrait sa force multipliée par un million (la force dépendant de la surface de la section musculaire), mais sa masse serait multipliée par un milliard (soit le cube du volume de

Chercheur au quotidien

Sébastien Balibar
Seuil, 2014
(70 pages, 5,90 euros).

Je cours, je cours… a constaté l'auteur, lorsqu'il a pris un moment pour considérer sa vie de chercheur. Sur un ton très vivant, un physicien distingué retrace sa vie intérieure quotidienne alors qu'il cherche, construit et mène avec son équipe des expériences pour mettre en évidence la superplasticité de cristaux d'hélium formés à très basse température. Puis, nous ayant conté l'aventure d'une campagne scientifique, le voilà qui s'interroge à nouveau : Mais pourquoi est-ce que je cours autant ? Pour le plaisir ! finit-il par comprendre. Celui d'accroître les connaissances.

Survivants

Chris Stringer
Gallimard, 2014
(467 pages, 26,50 euros).

Pourquoi sommes-nous les seuls humains sur Terre ? Voilà la question à laquelle répond l'auteur en retraçant l'évolution du genre *Homo* jusqu'à la situation actuelle. Pourquoi *Homo sapiens* ? Cela reste mystérieux, mais le grand contributeur à la théorie d'une origine africaine proche de l'humanité actuelle attire notre attention sur ce qui est sans doute l'une des originalités de la socialité ***sapiens*** : notre capacité à imiter ceux qui réussissent. Alors, si vous voulez penser le devenir de l'humanité, soyez sapiens et lisez cet excellent livre.

La nature et les Grecs

Erwin Schrödinger
Les Belles Lettres, 2014
(228 pages, 25,50 euros).

L'un des pères de la théorie quantique n'y croyait qu'à moitié et estimait que la physique moderne s'enfonçait dans une « crise d'intelligilité ». Il écrivit ce livre pour essayer d'en situer la racine dans un héritage culturel ancien discutable : celui des penseurs grecs qui auraient ancré en nous deux préjugés, à savoir que la réalité s'explique entièrement par la *ratio* et que la seule connaissance valable que l'on puisse avoir sur elle est celle qui est commune, objective. Le philosophe des sciences Michel Bitbol, qui a traduit ce texte important, l'accompagne d'un passionnant commentaire.

Chroniques du vivant

F. Letourneux et N. Fontrel
Buchet/Chastel, 2014
(128 pages, 18 euros).

La biodiversité, ce n'est pas juste des histoires d'espèces en voie de disparition. C'est aussi des interactions de plantes, d'insectes, de mammifères, d'hommes et parfois de chercheurs. Les auteurs mettent ainsi en scène avec beaucoup de poésie le « tissu vivant de la planète » et racontent par de courts récits comment les uns ont besoin des autres pour vivre. Ces chroniques sont une invitation à observer ce qui nous entoure, et à en prendre soin pour continuer de s'émerveiller devant sa richesse.

Savants et inventeurs entre la gloire et l'oubli

P. Bret et G. Pajonk (dir.)
CTHS, 2014
(134 pages, 23 euros).

Pourquoi un scientifique est-il reconnu, tandis qu'un autre, autant ou plus important, ne l'est pas ? À la faveur du regain d'activité biographique depuis 20 ans, les historiens des sciences se sont penchés sur la question. Les auteurs s'en sont servi pour illustrer ce phénomène par les histoires diverses de collectifs mal reconnus ou de chercheurs atypiques. Par exemple, les femmes astronomes, parce qu'elles étaient femmes, étaient atypiques et maintenues dans l'ombre d'un père, d'un frère ou d'un mari.

Le nuage noir

Fred Hoyle
Éditions de l'Évolution, 2014
(312 pages, 15 euros).

1964. Un mystérieux nuage noir s'avance droit sur le Système solaire, menaçant d'occulter le Soleil pendant plusieurs mois. Quel sort réserve-t-il à la Terre ? Comment réagiraient scientifiques, gouvernements et populations à un tel scénario ? Tel est le récit proposé en 1957 par l'astronome Fred Hoyle (connu pour son opposition à la théorie du Big Bang). Cette réédition plus de 30 ans après sa publication en France, accompagnée d'un éclairage scientifique de l'astronome James Lequeux, se lit avec délectation, tant les relations humaines et les rouages des événements et des réflexions sont décrits avec acuité.

la puce). Pour autant, ce n'est pas parce qu'une construction imaginaire ne repose pas sur une base scientifique exacte qu'elle est sans valeur. L'auteur souligne en effet combien la petitesse des insectes est utile pour penser un monde différent et pour relativiser les évidences de notre perception. Du reste, les exemples de nanisme et de gigantisme sont nombreux dans la littérature comme dans l'art.

Tour à tour historien et philosophe, l'auteur aborde au fil des chapitres des problématiques variées et originales. Ainsi, la diversité des insectes permet d'évoquer la construction historique de la taxinomie, les insectes sociaux servent de modèle pour décrire l'organisation politique des sociétés humaines et le mimétisme batésien (l'imitation d'une espèce dangereuse par une espèce inoffensive) permet de réfléchir à l'importance et au rôle des insectes comme modèles scientifiques.

Cet ouvrage a deux qualités précieuses. Il offre une bonne initiation à des questions variées et complexes tout en restant accessible à tous ; et en prenant comme sujet les insectes, il comble une lacune regrettable dans la pensée consacrée au vivant.

Valérie Chansigaud
Laboratoire SPHERE, CNRS-Université Paris Diderot

■ **ASTROPHYSIQUE**

Concorde 001 et l'ombre de la Lune

Pierre Léna
Le Pommier, 2014
(144 pages, 17 euros).

Les personnes qui ont eu la chance d'assister à une éclipse solaire décrivent cet événement comme un spectacle naturel époustouflant. De telles éclipses ont aussi, au fil des siècles, joué un rôle de premier ordre dans l'avancée des connaissances : voici un ouvrage pour s'en rendre compte. Il raconte la plus longue observation d'une éclipse de Soleil jamais réalisée.

Ces éclipses ont été intéressantes parce qu'elles ont permis de comprendre la nature de la couronne solaire (au XIX^{e} siècle) ou de vérifier (au début du XX^{e} siècle) l'une des prédictions de la théorie de la relativité générale (la déviation de la lumière par le champ gravitationnel du Soleil). Elles se produisent lorsque l'ombre de la Lune balaie la surface de la Terre, à une vitesse de plus de 2 000 kilomètres par heure. Les observateurs présents sur le trajet de cette ombre portée peuvent alors voir la Lune masquer le Soleil, partiellement ou complètement, pendant quelques minutes.

Astrophysicien renommé et membre de l'Académie des sciences, P. Léna fait le récit d'un superbe pari qu'il a tenu en juin 1973 : équiper le *Concorde* (le plus gros avion pouvant voler à Mach 2) d'instruments de mesure et le faire voler durant une éclipse de Soleil selon une trajectoire qui suit l'ombre de la Lune, pour allonger la durée d'observation de cette éclipse.

L'auteur connaît très bien l'histoire des observations astronomiques embarquées sur des avions, pour y avoir joué lui-même un rôle important, à plusieurs reprises. La description des objectifs et les résultats scientifiques obtenus par cette expérience (notamment la mise en évidence des anneaux de poussière proches du Soleil) ne constituent pas le cœur de

l'ouvrage. P. Léna s'intéresse davantage aux aspects humains, technologiques et politiques de cette aventure scientifique. L'un des grands intérêts du récit est de montrer comment naît puis se développe un projet expérimental de grande envergure, depuis les accords de principe initiaux, en grande partie fondés sur la confiance entre les divers intervenants, politiques et scientifiques, jusqu'au vol final, en passant par la recherche de fonds et à la définition précise du projet.

P. Léna décrit très bien aussi les interactions des ingénieurs avec les chercheurs : le *Concorde* mettait en jeu des technologies entièrement nouvelles et le percer de plusieurs hublots supplémentaires, au plafond, pour y placer des télescopes et autres instruments de mesure, constituait un défi de taille !

Enfin, c'est tout simplement une formidable épopée qui nous est racontée et le lecteur, dès les premières pages, ne peut qu'être captivé.

Richard Taillet
Université de Savoie, Annecy

Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur www.pourlascience.fr

© Pour la Science - n° 440 - Juin 2014

Puisez l'information scientifique à la source

Abonnez-vous

OFFRE WEB ILLIMITÉ

100 % numérique

Pour la Science
+ *Dossier Pour la Science*
+ *les archives depuis 1996*
+ un numéro *Les génies de la science* OFFERT !

6,50 € par mois seulement

BULLETIN D'ABONNEMENT

POUR LA SCIENCE

À découper ou à photocopier et à retourner accompagné de votre règlement dans une enveloppe non affranchie à : Groupe Pour la Science - Service Abonnements - Libre réponse 90 382 - 75 281 Paris cedex 06

1. MA FORMULE

❑ **OUI, je m'abonne à l'offre Web illimité à 6,50 € par mois** ou 78 € pour 1 an. Pendant toute la durée de mon abonnement, je bénéficie d'**un accès numérique illimité** au mensuel *Pour la Science* + son trimestriel *Dossier Pour la Science* + 18 ans d'archives sur **www.pourlascience.fr** ! En cadeau de bienvenue, je reçois *Les génies de la science* n°33 "Pasteur, microbes et controverses" pour (re)découvrir le parcours de cet illustre scientifique, pionnier de la microbiologie (réf. M0750092 - valeur 6,90 €).

Mon e-mail obligatoire pour l'accès aux contenus numériques *(à remplir en majuscules)*

@

À réception de votre bulletin, comptez 5 semaines pour recevoir votre n° d'abonné. Passé ce délai, merci d'en faire la demande à abonnements@pourlascience.fr

2. MES COORDONNÉES

Nom : Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville : Pays : Tél. : Pour le suivi client (facultatif)

3. MON MODE DE RÈGLEMENT

❑ Je règle par prélèvement **6,50 € par mois***. Je remplis l'autorisation ci-dessous en joignant impérativement un IBAN/BIC.

POUR LA SCIENCE

AUTORISATION DE PRÉLÈVEMENT PAR MANDAT SEPA

En signant ce mandat SEPA, j'autorise Pour la Science à transmettre des instructions à ma banque pour le prélèvement de mon abonnement dès réception de mon bulletin. Je bénéficie d'un droit de rétractation dans la limite de 8 semaines suivant le premier prélèvement. Plus d'informations auprès de mon établissement bancaire.

1 - COORDONNÉES DU TITULAIRE DU COMPTE

Nom, prénom

Adresse
Numéro et nom de la rue

Code postal Ville Pays

2 - COORDONNÉES BANCAIRE

IBAN
Numéro d'identification international du compte bancaire – IBAN (International Bank Account Number)

BIC
Code international d'identification de votre banque – BIC (Bank Identifier Code)

Type de paiement Paiement récurrent/répétitif

3 - DATE ET SIGNATURE OBLIGATOIRE

À

Date

Signature :

NOM DU CRÉANCIER Pour la Science
8 rue Férou – 75006 Paris

ICS N° FR92ZZZ426900

N° de référence unique de mandat (RUM)

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

❑ Je préfère régler mon abonnement d'un an en **une seule fois 78 €***

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

❑ Par carte bancaire N°

Date d'expiration Clé

Signature obligatoire

* Offre numérique, valable sans limitation de zone géographique. L'abonnement en prélèvement est renouvelé tacitement à échéance et dénonçable à tout moment avec un préavis de 1 mois. En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès du groupe *Pour la Science*. **Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'organismes partenaires. En cas de refus de votre part, merci de cocher cette case** ❑

PLS440 Offre réservée aux nouveaux abonnés valable jusqu'au 30.06.2014

BLOC-NOTES

de **Didier Nordon**

Y CROIRE POUR LE VOIR

Si, un jour, on réussit à transférer l'esprit d'un individu sur un robot afin de lui conférer l'immortalité, les conséquences seront vertigineuses. Y réfléchir est urgent. Mais j'en suis incapable, parce que je ne m'attends pas à ce que ce projet se réalise.

Or l'intuition précède la réflexion. Pour se mettre à réfléchir à un objet (fût-ce en s'y opposant), il faut, au préalable, le prendre au sérieux, c'est-à-dire avoir l'intuition, plus ou moins perspicace, qu'il a ou aura un minimum de consistance. Ainsi, on ne se consacre pas aux sciences si on ne compte pas sur elles pour agir ou pour comprendre quelque chose du monde. Mais on ne les critique pas non plus si on ne leur accorde aucune importance : Sartre s'est contenté de dire « science, c'est peau de balle », ce qui ne mène pas loin la réflexion.

Les projets transhumanistes (comme celui évoqué ci-dessus) inspirent d'abord une réaction subjective : l'observateur croit, ou non, à leur vraisemblance. Et plus il y croit, mieux il est placé pour réfléchir à ce que provoquerait leur réalisation.

L'ŒIL DE LA CAMÉRA

Un parterre de fleurs dans un jardin public. Des gens s'approchent. « Magnifique ! » Ils attrapent leur téléphone, prennent une photo, s'éloignent. Leur station près du massif n'a pas duré plus d'une seconde.

Les scènes de ce genre sont fréquentes. Je doute pourtant que l'art de la photo hâtive apporte une satisfaction réelle. Il y a peu de chances que les gens se délectent de la photo après avoir négligé le massif, bien plus plaisant. Je crois plutôt que la photo hâtive permet d'éviter une inquiétude qui accompagne souvent le plaisir.

Celui qui se perd dans la contemplation du massif ne sait jamais quand celle-ci doit cesser. Regarder très longtemps, jusqu'à ce que le plaisir se mue en lassitude, voire en ennui, est dommage. Ne pas regarder assez, se laisser bousculer par les tâches à faire, et partir frustré, est dommage aussi. Le moment idéal pour s'en aller est si fugitif, qu'il est à peu près impossible à saisir.

On peut regarder le parterre tant qu'on veut, mais on ne peut pas éprouver le sentiment d'en avoir joui à la perfection. Voilà le trouble auquel échappe celui qui prend une photo plutôt que de regarder.

LA FORMULE DU PRINCE

En dédiant des quatuors au prince Razoumovsky, une sonate au comte Waldstein, un trio à l'archiduc Rodolphe, Beethoven a contribué à la gloire de ces altesses. Je ne vois pas d'analogue en sciences : pas de « Théorème à Monseigneur Séguier, Chancelier de France » chez Fermat, pas de loi offerte en « Respectueux Hommage à Sa Majesté Anne Stuart, Reine de Grande-Bretagne et d'Irlande » chez Newton. Pas non plus de dédicataires chez Euler. Là, c'est dommage. Cela nous aurait simplifié la vie. Il existe tant de « formules d'Euler », qu'on ne s'y retrouve pas.

S'il avait dédié la formule $\sum 1/n^2=\pi^2/6$ (dite formule d'Euler) à la « mémoire immortelle de feue Son Excellence Catherine I^re^, Impératrice de toutes les Russies », nous l'appellerions formule de l'Impératrice.

S'il avait dédié la formule $s-a+f=2$ (dite formule d'Euler) à sa femme Katharina, nous parlerions de la formule à Katharina (comme on parle de la sonate à Thérèse).

Ou encore, s'il avait dédié la formule $\exp(ix)=\cos x+i\sin x$ (dite formule d'Euler) à « Sa Majesté Frédéric II, roi de Prusse », nous aurions le plaisir de nous servir de la formule du roi de Prusse.

Rien n'empêchait Euler d'agir de même avec les mille autres « formules d'Euler ». Les altesses ne manquaient pas plus à son époque qu'à celle de Beethoven. Les mathématiques auraient gagné en clarté.

L'ARROGANCE DE L'UNIVERSEL

Une traduction n'est pas un calque parfait du texte original. Chaque langue apporte ses nuances propres. Aucun énoncé n'a un sens totalement indépendant de celle dans laquelle il est exprimé. En cela, aucun n'est universel. Pas même « deux et deux font quatre », qui se dit en allemand (mot à mot) « deux et deux est quatre » et en espagnol « deux et deux sont quatre ». Par ailleurs, la croyance en l'universel nourrit souvent un impérialisme intellectuel. Celui qui est convaincu de l'universalité d'une théorie veut imposer celle-ci.

Mal fondé, de mauvais conseil, le mot universel est-il à bannir ? Non, à condition de lui faire rabattre de sa superbe. Sylvie Catellin propose un renversement intéressant. À propos d'un conte qui s'est diffusé de pays en pays, et dont le sens varie avec les contextes, elle écrit : « Le savoir qu'il contient, comme toutes les formes de savoir, est universel parce qu'il circule (et non l'inverse) » (*Sérendipité*, Seuil, 2014).

La notion d'universel fait d'habitude l'objet de spéculations abstraites de haute volée. En donner une définition relevant du simple constat empirique a quelque chose d'humiliant pour elle. Justement. Elle nourrit trop d'arrogance théoricienne. Moucher ses prétentions est sain. ■

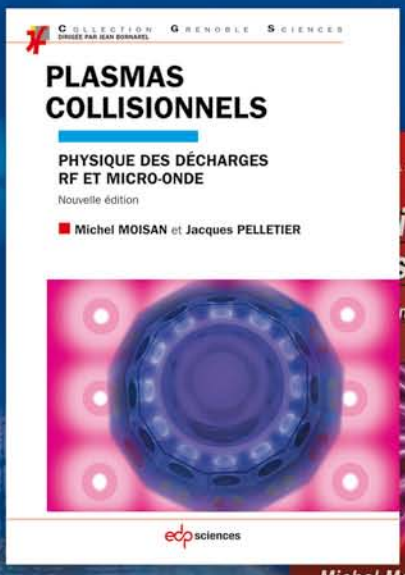
Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal 5636 – Juin 2014 – N° d'édition M0770440-01 – Commission paritaire n° 0917 K 82079 –
Distribution : NMPP – ISSN 0 153-4092 – N° d'imprimeur 101/189 937 – Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé.

GRENOBLE SCIENCES

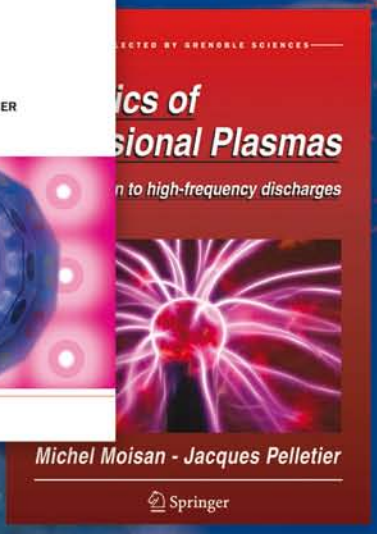
Les nouveautés en physique

POUR LES ÉTUDIANTS ET LES INGÉNIEURS

Les applications après les fondements

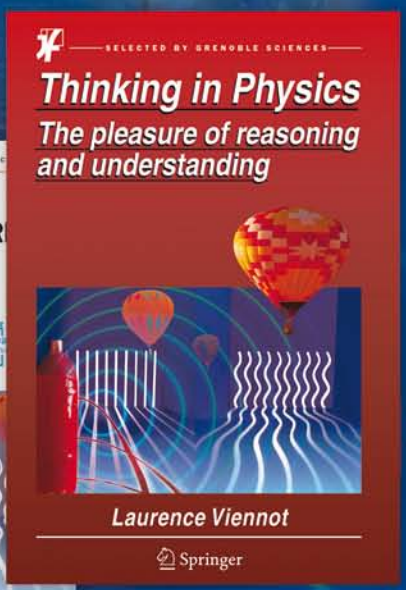


La nouvelle édition française



POUR LES ENSEIGNANTS ET LES ÉTUDIANTS

La version anglaise vient de paraître



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

POUR COMMANDER

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

GRENOBLE SCIENCES

Université Joseph Fourier GRENOBLE

http://www.grenoble-sciences.com

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

Région RhôneAlpes

TBWA\PARIS

Votre vocation fait votre fierté, la nôtre est de vous assurer.

Exercer son talent au service des autres est une mission que nous partageons. C'est pourquoi, **la GMF, 1er assureur des agents des services publics** en fait toujours plus pour vous assurer dans votre vie personnelle (assurance auto, habitation, complémentaire santé, épargne) et vous accompagner dans votre vie professionnelle. À votre tour, rejoignez nos 3 millions de sociétaires pour profiter **des offres privilégiées** que nous vous réservons.

POUR LES MOINS DE 30 ANS

50 € OFFERTS*

SUR VOTRE ASSURANCE AUTO

Renseignez-vous au **0 970 809 809** (numéro non surtaxé) ou sur **www.gmf.fr**

*Offre réservée aux agents des services publics de moins de 30 ans, la 1re année, à la souscription d'un contrat d'assurance auto, valable jusqu'au 31/12/2014.

LA GARANTIE MUTUELLE DES FONCTIONNAIRES et employés de l'État et des services publics et assimilés - Société d'assurance mutuelle - Entreprise régie par le Code des assurances - R.C.S. Paris 775 691 140 - Siège social : 76, rue de Prony - 75857 Paris Cedex 17 et ses filiales GMF Assurances, La Sauvegarde et GMF Vie. Adresse postale : 45930 Orléans Cedex 9.

ASSURANCES MUTUELLES DE FRANCE - Société d'assurance mutuelle - Entreprise régie par le Code des assurances - R.C.S. Paris 323 562 678 - Siège social : 11, place des Cinq Martyrs du Lycée Buffon - 75014 Paris. Adresse postale : 45930 Orléans Cedex 9.

80 ans GMF

ASSURÉMENT *Humain*