NEUROBIOLOGIE
Comment le cerveau régule l'appétit

MATHÉMATIQUES
Promenades sur un échiquier infini

MÉTÉOROLOGIE
Le jet-stream est-il déréglé ?

POUR LA SCIENCE

Mars 2015 - n° 449

www.po

Édition française de Scientific American

LA VIE AILLEURS

Des milliards de planètes superhabitables

M 02687 - 449 - F: 6,20 € - RD

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

FONDATION ÉCOLOGIE D'AVENIR

INSTITUT DE FRANCE

COLLOQUE

LA BIODIVERSITÉ: du concept à la réalité

Sous la direction d' ALAIN PAVÉ
(Académie des technologies et Université de Lyon I)

Avec la participation de:
Bernard Le Buanec (Académies des technologies et d'Agriculture)
Christian Lévêque (Académie d'Agriculture)
Dominique Pontier (Université Lyon I)
Carole Zakine (InVivo AgroSolutions)

Jeudi 19 mars 2015

15H-19H

LA MAISON DU BARREAU
4 RUE DE HARLAY - 75001 PARIS

Entrée gratuite - Réservation obligatoire - Places limitées
Informations, programme et inscription: www.fondationecologiedavenir.org

POUR LA SCIENCE

www.pourlascience.fr

8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06

Groupe POUR LA SCIENCE
Directrice des rédactions : Cécile Lestienne

Pour la Science
Rédacteur en chef : Maurice Mashaal
Rédactrice en chef adjointe : Marie-Neige Cordonnier
Rédacteurs : François Savatier, Philippe Ribeau-Gésippe, Guillaume Jacquemont, Sean Bailly

Dossier Pour la Science
Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin

Cerveau & Psycho • L'Essentiel Cerveau & Psycho
Rédacteurs en chef adjoints : Sébastien Bohler et Bénédicte Salthun-Lassalle
Rédacteur : Guillaume Jacquemont

Développement numérique : Philippe Ribeau-Gésippe
Directrice artistique : Céline Lapert
Secrétariat de rédaction/Maquette : Sylvie Sobelman, Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy
Marketing : Élise Abib et Ophélie Maillet
Direction financière et direction du personnel : Marc Laumet
Fabrication : Marianne Sigogne et Olivier Lacam
Presse et communication : Susan Mackie
Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé
Anciens directeurs de la rédaction : Françoise Pétry et Philippe Boulanger
Conseiller scientifique : Hervé This
Ont également participé à ce numéro : Pierre Camberlin, Francis Eustache, Sophie Gallé-Soas, Olivier Groussin, Eitan Haddok, Catherine Jami, Christophe Pichon

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

SERVICE ABONNEMENTS
Ginette Bouffaré et Nada Mellouk-Raja. Tél. : 01 55 42 84 04
Abonnement en ligne : http://www.pourlascience.fr
Courriel : abonnements@pourlascience.fr
Service des abonnements - 8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06

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

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

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

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

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

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

OJD PRESSE PAYANTE Diffusion Certifiée 2012

Maurice Mashaal
rédacteur en chef

Un paradis céleste... ou extraterrestre ?

L'anthropocentrisme a dû céder beaucoup de terrain au fil des siècles. De Copernic à Darwin, de l'astronomie à la biologie moléculaire, les arguments et les preuves allant à l'encontre d'une place privilégiée de l'homme se sont accumulés. La prétentieuse conception qui voit les humains comme le *nec plus ultra* du monde vivant et leur planète comme le centre de l'univers semble bien dépassée.

Cependant, l'anthropocentrisme a la peau dure, même au XXIe siècle. L'un des avatars de cette vision est l'idée assez répandue que la vie, et *a fortiori* la vie intelligente, existe seulement sur Terre. Et même quand nous croyons à l'existence d'extraterrestres intelligents, nous nous les représentons humanoïdes *(voir Trop d'extraterrestres à notre image, pages 86-87)*.

À la quête de planètes plus grosses que la Terre, autour d'étoiles plus petites que le Soleil.

Un autre avatar de l'anthropocentrisme est de penser que notre planète est, sinon idéale pour la vie, parmi les plus hospitalières. C'est ainsi que les astronomes espérant trouver des mondes où de la vie est présente recherchent des couples étoile-planète qui ressemblent au sustème Soleil-Terre.

Ce n'est pourtant pas la meilleure piste, explique l'astrophysicien allemand René Heller *(voir Des exoplanètes plus accueillantes que la Terre, pages 24-31)*. Plusieurs arguments indiquent en effet que des planètes un peu plus grosses que la Terre et en orbite autour d'une étoile plus petite que le Soleil seraient plus propices à la vie.

Et qui sait, peut-être ces mondes lointains abritent-ils des civilisations où personne ne consacre son énergie à interdire, haïr et occire. Rêvons d'un tel paradis, il n'est sans doute pas plus imaginaire que celui auquel croient les fanatiques. ■

sommaire

3 Edito

Actualités

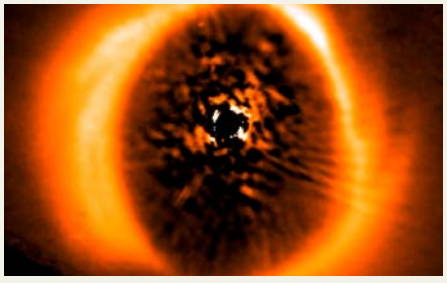
5 Un vieux crâne d'homme moderne qui en dit long

7 Le LHC redémarre à plus haute énergie

8 Des souvenirs stockés au cas où...

9 Un gel qui se contracte à la lumière

13 Théâtre d'ombres dans un disque protoplanétaire



Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

14 Point de vue
Le bisphénol A n'est pas une affaire classée
Barbara Demeneix et Vincent Laudet

16 Entretien
« Si mon blog donne envie de lire un livre de science, c'est gagné ! »
Marion Montaigne

19 Lu sur SciLogs.fr
Quelles zébrures pour le zèbre ?
Jean-Louis Hartenberger

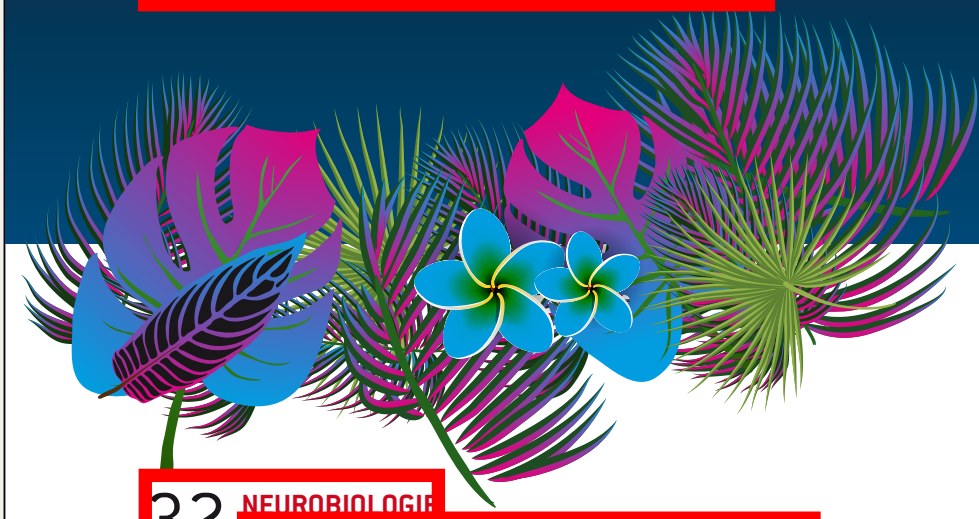
20 Homo sapiens informaticus
Aplatir ou applatir ?
Gilles Dowek

22 Cabinet de curiosités sociologiques
L'extension du domaine de la crédulité
Gérald Bronner

Ce numéro comporte deux encarts d'abonnement Pour la Science sur la diffusion en kiosque ainsi qu'un encart Alternatives économiques posé sur la diffusion abonnés France métropolitaine. En couverture : © Devor/shutterstock.com (végétation) ; © Macrovector/shutterstock.com (planètes)

À LA UNE

24 ASTROPHYSIQUE
Des exoplanètes plus accueillantes que la Terre
René Heller
Sur des planètes un peu plus grosses que la nôtre, autour d'étoiles plus petites que le Soleil, la vie trouverait des conditions plus favorables que sur Terre. De tels mondes existeraient par milliards.



32 NEUROBIOLOGIE
Pourquoi vous avez faim... ou pas !
Gilles Mithieux
Pour réguler la sensation de faim, le cerveau sonde en permanence les réserves énergétiques et nutritionnelles de l'organisme. Les échanges nerveux avec le système digestif joueraient un rôle clef.

40 MATHÉMATIQUES
Compter les excursions sur un échiquier
Alin Bostan et Kilian Raschel
Le dénombrement des chemins allant d'un point à un autre d'un réseau est un problème mathématique difficile. Illustration avec le cas des marches dites de Gessel, récemment résolu.

48 IMAGERIE
Voir la vie en grand
Kate Wong
D'abord outil pour les chercheurs, le microscope est aussi devenu un instrument au service de l'art. Pour sublimer les détails du vivant invisibles à l'œil nu, il est à l'honneur dans le concours *Olympus BioScapes*.

56 MÉTÉOROLOGIE
Le jet-stream polaire se dérègle-t-il ?
Jeff Masters
Ces dernières années, de nombreux aléas climatiques ont marqué les étés et les hivers de l'hémisphère Nord. Une perturbation du jet-stream polaire, peut-être due à la fonte de la banquise arctique, est en jeu.

64 BIOLOGIE
Un héritage d'un nouveau genre
Michael Skinner
Des polluants ou un stress peuvent altérer l'expression des gènes sans modifier les séquences génétiques. Certaines de ces anomalies – et les maladies associées – se transmettraient aux générations suivantes.

Rendez-vous

74 Histoire des sciences
L'affaire du calendrier chinois
Pingyi Chu
En 1664, des missionnaires jésuites en Chine furent condamnés à mort pour avoir mal choisi la date des funérailles du fils de l'empereur.

80 Logique & calcul
Les *blockchains*, clefs d'un nouveau monde
Jean-Paul Delahaye
On sait maintenant réaliser des supports inscriptibles, partagés et infalsifiables. Ce qu'il est possible d'en faire est étonnant et révolutionnaire.

86 Science & fiction
Trop d'extraterrestres à notre image
Roland Lehoucq et J. Sébastien Steyer

88 Art & science
L'art au service de la vaccination
Loïc Mangin

90 Idées de physique
La bouteille qui chante
Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

93 Question aux experts
Combien de temps peut-on tenir sans dormir ?
Marie-Françoise Vecchierini

95 Science & gastronomie
Un metchnikoff de fraises
Hervé This

96 À lire

98 Bloc-notes
Les chroniques de Didier Nordon

Aussi en numérique !

POUR LA SCIENCE .fr

Archives depuis 1998

Application smartphone et tablette

Suivez-nous sur les réseaux sociaux

Paléontologie humaine

Manot 1 : un vieux crâne d'homme moderne qui en dit long

Découvert dans une grotte en Israël, un crâne de Homo sapiens vieux de 55 000 ans ouvre des hypothèses sur le métissage de nos ancêtres pré-européens avec les Néandertaliens.

La calotte crânienne Manot 1 a été découverte dans une grotte de Galilée. Les outils *(en haut à gauche)* trouvés dans la zone C *(en bas à gauche)*, plus récents que Manot 1, ont été façonnés dans un style dit du Paléolithique supérieur initial, attribué à *Homo sapiens*.

La protubérance de l'os occipital, ou chignon occipital, est l'un des traits caractéristiques de *Homo neanderthalensis*. On la trouve aussi souvent sur les nuques d'Européens modernes. Comme ces derniers partagent environ 20 % de leurs gènes avec *H. neanderthalensis* (mais moins de 3 % à titre individuel), on pensait que, chez les formes européennes, on pouvait attribuer la protubérance aux Néandertaliens, avec qui nos ancêtres – tous des immigrés africains ! – se sont métissés.

La découverte d'un crâne partiel de *Homo sapiens* dans la grotte de Manot, en Israël, jette un doute sur cette hypothèse. Ce crâne, nommé Manot 1, est doté de la protubérance occipitale, et comme il date de 50 000 à 55 000 ans, une autre possibilité est que les Européens aient acquis leur chignon occipital d'une population *sapiens* sortie d'Afrique il y a environ 60 000 ans.

Voyons pourquoi. Les données documentant la conquête de la planète par l'homme moderne montrent que des chasseurs-cueilleurs *H. sapiens* étaient présents en Australie il y a plus de 50 000 ans, mais seulement à partir de 45 000 ans en Europe. Or l'Afrique se trouve à 15 000 kilomètres de déserts, de montagnes, de forêts et de mer du continent des kangourous, tandis que l'Europe n'en est qu'à 1 500 kilomètres de steppes dégagées…

Pourquoi ce décalage ? La réponse est liée à deux évidences : d'une part, pour des chasseurs-cueilleurs tropicaux, l'Europe était glaciale ; d'autre part, ce continent était déjà occupé par des chasseurs-cueilleurs bien adaptés au froid : les Néandertaliens.

C'est pourquoi la présence de *H. sapiens* au Levant il y a 55 000 ans importe. Pour l'établir, Israel Hershkovitz, de l'Université de Tel Aviv, et son équipe ont d'abord prélevé 11 échantillons de la calcite (calcaire stalagmitique) recouvrant le crâne, puis mesuré leur âge par l'horloge radiométrique uranium-thorium.

Pour prouver ensuite que Manot 1 est un *H. sapiens*, les chercheurs ont passé l'os frontal supérieur, les os pariétaux (tempes) et l'os occipital (la nuque) de la calotte découverte au crible d'une étude anatomique serrée. Le caractère gracile de ce crâne d'un volume intérieur de 1 000 centimètres cubes (contre 1 400 en moyenne de nos jours) le distingue d'un épais crâne néandertalien, dont la forme allongée vers l'arrière diffère aussi beaucoup de celle de Manot 1 et de nos têtes.

L'analyse statistique de mille autres détails place le crâne non seulement très loin des Néandertaliens, mais aussi à mi-chemin entre les Africains et les Européens *sapiens* du Paléolithique supérieur (40 000 à 10 000 ans) ; elle distingue aussi Manot 1 des premiers *H. sapiens* du Levant, dont certains ont été inhumés il y a quelque 100 000 ans dans les grottes de Skhul et de Qafzeh, en Israël.

Comme la plupart des fossiles des tout premiers *H. sapiens* d'Europe, Manot 1 a un chignon

occipital. Cela passionne les paléoanthropologues, car une hypothèse possible est que l'individu auquel il appartenait ait fait partie d'une population de *H. sapiens* « à chignons », qui serait ancêtre de la population européenne.

Toutefois, il est aussi envisageable que, après s'être introduite dans le corridor levantin, il y a quelque 60 000 ans, la population ancêtre des Européens y ait acquis ses chignons occipitaux par métissage avec des Néandertaliens. Un Néandertalien enterré il y a 50 000 ans a en effet été retrouvé dans la grotte de Kebara, à 50 kilomètres au Sud de Manot…

Or, après le séquençage du génome d'un homme moderne mort il y 45 000 ans en Sibérie, et contenant 2 % d'ADN néandertalien, les bio-informaticiens ont pu établir que le premier (et sans doute le plus important) métissage avec les Néandertaliens s'est produit il y a 60 000 à 50 000 ans. Le crâne Manot 1 indique donc que des *H. sapiens*, probables ancêtres des Eurasiens, ont bien vécu au Levant en même temps que des Néandertaliens, durant l'époque estimée du métissage.

Pour en savoir plus, il faudrait retrouver de l'ADN nucléaire dans Manot 1. C'est très peu probable sous un climat chaud, mais « nous n'avons pas perdu espoir, car Manot 1 a été découvert dans une grotte », confie Israel Hershkovitz. Quoi qu'il en soit, il y a fort à parier que les Néandertaliens et la population dont faisait partie Manot 1 ont eu des échanges culturels et biologiques. Ces échanges expliquent sans doute la soudaine adaptation au froid dont ont fait preuve les migrants africains qui ont peuplé l'Europe et recueilli les gènes néandertaliens.

François Savatier

I. Hershkovitz et al., Nature, en ligne le 28 janvier 2015

Physique des particules

Le LHC redémarre à plus haute énergie

Le Grand collisionneur de hadrons (LHC, pour *Large Hadron Collider*) au Cern, près de Genève, est remis en marche après 18 mois de maintenance. Frédérick Bordry, directeur des accélérateurs et des technologies du Cern, décrit les changements opérés sur le LHC et les étapes de remise en fonctionnement avant la reprise des expériences.

L'arrêt de maintenance était-il prévu ?

Frédérick Bordry : Le LHC est entré en opération en novembre 2009 et nous avons pris des données jusqu'en février 2013 sans arrêt technique majeur. Le LHC accélère des protons ou des ions dans un anneau de 27 kilomètres de circonférence. Pour courber la trajectoire des particules, nous utilisons des aimants supraconducteurs refroidis à 1,9 kelvin. Arrêter la machine et la remettre en route prend du temps. Nous avions prévu d'effectuer un arrêt de plus d'un an en 2012. Mais comme le boson de Higgs pointait le bout de son nez, l'arrêt a été repoussé à 2013.

En quoi consistait cette maintenance ?

F. B. : Après 40 000 heures de fonctionnement, certaines pièces, tels les compresseurs du système cryogénique, nécessitent une révision. Nous avons aussi modifié certains éléments de l'accélérateur et des détecteurs qui n'avaient pas été aussi performants que prévu.

Certaines réparations sont-elles liées à la panne du LHC survenue en 2008 ?

F. B. : Tout à fait. Un arc électrique sur une connexion entre deux aimants supraconducteurs avait entraîné des détériorations sur près de 500 mètres du LHC. Les aimants sont instables et peuvent perdre subitement leur supraconductivité. La résistance électrique n'est alors plus nulle et il faut rapidement évacuer l'énergie stockée dans le circuit en réduisant le courant, sinon cela provoque des dégâts comme en 2008.

Quelle a été la solution ?

F. B. : Entre 2009 et 2012, nous avons limité l'énergie des faisceaux de protons

Frédérick Bordry, directeur des accélérateurs du Cern.

à 7 téraélectronvolts (TeV) par collision, puis 8 TeV en 2013. Cela nous a permis de fonctionner avec un courant réduit dans les aimants.

Cependant, le LHC était prévu pour fonctionner à une énergie de 14 TeV par collision. Pour ce faire, nous devions renforcer les connexions entre les aimants afin d'encaisser les courants intenses en cas de perte de la supraconductivité : 30 % des interconnexions ont été refaites et des systèmes de dérivation ont été installés. Jusqu'à 1 600 personnes ont travaillé sur l'accélérateur pendant cette période

Pourquoi le redémarrage se fera-t-il à 13 TeV ?

F. B. : C'est une question de temps. Pour faire fonctionner les aimants, on augmente progressivement l'intensité du courant. Pendant cette étape, la perte de supraconductivité est fréquente. Il faut alors répéter la procédure. Pour fonctionner à 13 TeV, nous avons estimé que chaque secteur de l'accélérateur perdrait entre 10 et 15 fois sa supraconductivité. À 14 TeV, c'est dix fois plus. Nous ferons le bilan après un an pour passer éventuellement à 14 TeV.

Que reste-il à faire avant le début des expériences ?

F. B. : Nous espérons rendre opérationnels les huit secteurs du LHC d'ici fin mars. Nous commencerons alors l'injection du faisceau de protons. Le calibrage prendra deux mois.

La prise de données par les physiciens pourra-t-elle débuter dès juin ?

F. B. : C'est l'objectif. Les physiciens ont un programme chargé : mesurer les propriétés du boson de Higgs, chercher des traces de nouvelle physique et, peut-être, découvrir de nouvelles particules !

Jean Baillu

Neurobiologie

Des souvenirs stockés au cas où...

Des expériences montrent que le cerveau stocke temporairement de multiples souvenirs a priori inutiles... et les renforce s'ils prennent de l'importance à la lumière d'événements nouveaux

Vous croisez une femme dans un supermarché et vous ne la remarquez pas. Par la suite, vous découvrez votre nouvelle voisine de palier, qui vous semble étrangement familière. Un peu plus tard, vous y repensez et... surprise ! Vous vous rendez compte que votre voisine n'est autre que cette femme croisée pendant vos courses.

Pourquoi ce souvenir du supermarché, que vous n'aviez même pas conscience d'avoir enregistré et que vous auriez vite oublié dans d'autres circonstances, vous est-il revenu ? Joseph Dunsmoor, de l'Université de New York, et ses collègues, ont montré qu'un souvenir anodin peut être renforcé *a posteriori* s'il prend de l'importance à la lumière d'événements nouveaux.

Au quotidien, nous sommes confrontés à un flot gigantesque d'informations – images, sons, odeurs, etc. Leur stockage à long terme dépasserait largement nos capacités mémorielles. Pourtant, on ne peut savoir à l'avance lesquelles se révéleront utiles. Les expériences réalisées par les neurobiologistes suggèrent alors que de multiples traces mémorielles sont créées, et que celles qui se révèlent les plus pertinentes sont renforcées par la suite.

Joseph Dunsmoor et ses collègues ont présenté des images d'outils ou d'animaux à des sujets, qui devaient les classer selon ces deux catégories. Dans une première phase, cette présentation s'effectuait de façon neutre. Lors d'une deuxième phase, elle était associée deux fois sur trois à un léger choc électrique au poignet pour l'une des deux catégories (outil ou animal). Aucun choc n'était administré lors de la troisième et dernière présentation.

Les neurobiologistes ont ensuite testé les souvenirs des participants, en leur montrant les images déjà présentées mêlées à de nouvelles. Chaque fois, le sujet devait dire s'il avait déjà vu l'image ou non.

Les participants se souvenaient mieux des images de la catégorie associée à un choc électrique et présentées lors des deuxième et troisième phases, ce qui n'est pas surprenant : la mémorisation est plus efficace quand l'émotion s'en mêle, et la peur du coup de jus se révélait stimulante ! Mais les images de la première phase correspondant à la même catégorie étaient aussi mieux mémorisées, alors que les participants n'avaient pas encore reçu de chocs électriques à cette étape. Ces souvenirs ont donc été renforcés *a posteriori*.

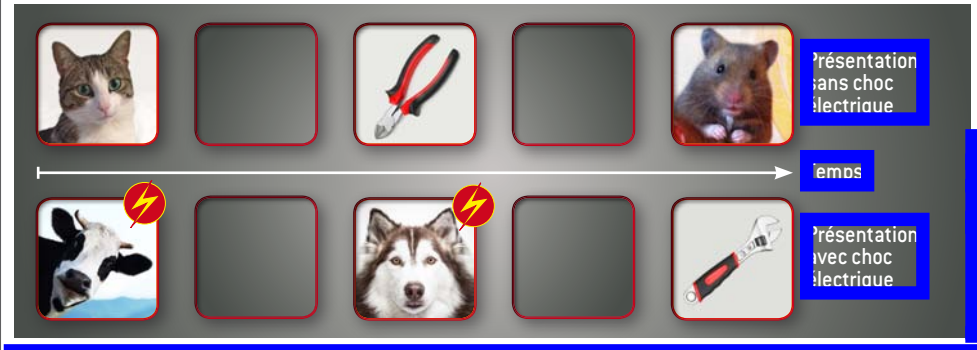
De nombreuses expériences avaient déjà montré que les souvenirs pouvaient être renforcés rétroactivement après une émotion. Mais ici, le renforcement est sélectif et ne concerne que les souvenirs acquérant une pertinence nouvelle.

Comment le cerveau opère-t-il ce tri sélectif ? Un premier souvenir faible (codé par un ensemble de modifications dans les connexions entre neurones) serait d'abord créé et, lorsqu'il se révèle important, serait « marqué » pour être renforcé plus tard. En effet, dans l'expérience de Joseph Dunsmoor, l'amélioration des souvenirs n'était constatée qu'à partir de quelques heures après la présentation des images.

Les mécanismes en cause restent à préciser, mais ils différeraient en tout cas de ceux à l'œuvre pendant le sommeil – lors duquel le cerveau rejoue les souvenirs, ce qui permet de les consolider. En effet, l'amélioration survenait même avant que les participants n'aient dormi.

Guillaume Jacquemont

J. Dunsmoor er al., Nature, en ligne le 21 janvier 2015



Les participants visualisent d'abord une séquence d'images d'outils ou d'animaux sans stimulation particulière *(en haut)*. Lors d'une deuxième présentation *(en bas)*, de légers chocs électriques sont associés aux images d'une des deux catégories (par exemple les animaux). Quelques heures plus tard, les sujets se souviennent mieux des images de cette catégorie, même quand elles ont été présentées lors de la première phase, c'est-à-dire avant les chocs. Ces souvenirs ont donc été renforcés *a posteriori*.

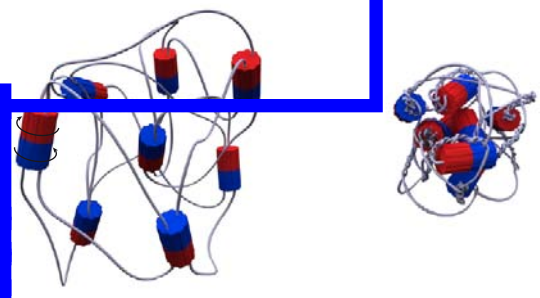
Physico-chimie

Un gel qui se contracte à la lumière

Comment un muscle se contracte-t-il ? Des millions de moteurs moléculaires, de taille nanométrique, ont une action coordonnée qui conduit à raccourcir des fibres musculaires de plusieurs centimètres. Ces moteurs, faits de molécules ou d'assemblages de molécules, sont essentiels au bon fonctionnement d'un système biologique. Les chimistes tentent de s'en inspirer pour créer des nanomoteurs synthétiques.

La principale difficulté est de coordonner l'action d'un ensemble de moteurs pour obtenir une action macroscopique. Nicolas Giuseppone et ses collègues, de l'Institut Charles Sadron à Strasbourg, ont mis au point des molécules photosensibles qui contractent le gel de polymères au sein duquel elles sont intégrées.

Au cœur de ces moteurs, deux molécules organiques, reliées par une liaison double, pivotent en sens opposés lorsqu'elles sont éclairées par de la lumière ultraviolette. Sur ces deux molécules, les chercheurs ont fixé des polymères, de longues chaînes carbonées.



Sur cette représentation schématique, des moteurs moléculaires rotatifs *(en rouge et bleu)* sont placés aux points de réticulation d'un gel de polymères. Lorsqu'ils sont activés, ils contractent le gel *(à droite)*

Les moteurs peuvent par exemple occuper les points de réticulation d'un gel de polymère, c'est-à-dire qu'ils sont situés aux nœuds interconnectant les macromolécules dans le gel. Sous l'effet de la lumière, les moteurs enroulent les polymères et l'effet coordonné dans le réseau conduit à une contraction macroscopique du gel.

Une conséquence intéressante de cette étude des moteurs moléculaires est la possibilité de stocker de l'énergie lumineuse, qui n'est pas totalement dissipée sous forme de chaleur mais convertie en énergie mécanique. Les chercheurs étudient la possibilité de contrôler précisément le phénomène pour faire de ces gels des supports de stockage de l'énergie lumineuse.

S. B.

Quan Li et al., Nature Nanotechnology, en ligne le 19 janvier 2015

Cycle diurne exoplanétaire

Pourquoi la Lune nous présente-t-elle toujours la même face ? Parce que sa période de rotation est égale à sa période de révolution autour de la Terre. Ce mouvement synchrone est dû aux effets de marée qui influent sur la rotation du satellite. On pensait que cela se produisait aussi pour des planètes proches de leur étoile, en particulier les exoplanètes de la taille de la Terre dans la zone dite habitable d'étoiles naines. Ce n'est pas toujours le cas, selon Jérémy Leconte, de l'Institut canadien d'astrophysique théorique à Toronto, et ses collègues. L'atmosphère, même ténue, d'une exoplanète empêche la synchronisation du mouvement orbital : l'étude de ces chercheurs montre que les frottements entre l'atmosphère et le sol tendent à s'opposer à l'effet des forces de marée.

Climatologie

La montée des océans réévaluée

Une étude menée par Carling Hay, de l'Université Harvard aux États-Unis, et des collègues montre que la montée des océans au cours du XX^{e} siècle aurait été surestimée de 30 %, mais que cette élévation s'accélère aujourd'hui.

L'élévation du niveau de la mer résulte de toute une série de phénomènes à court ou à long terme, dont les plus connus sont le réchauffement climatique et la fonte des glaciers et des calottes glaciaires. Pour mesurer cette élévation, on collecte les enregistrements des marégraphes (souvent de simples règles graduées !) en divers points du globe, puis on calcule le niveau moyen de l'océan.

Cette méthode souffre de biais. Par exemple les enregistrements sont bien plus nombreux et anciens dans l'hémisphère Nord. Pour pallier ces inconvénients, les chercheurs ont reconstitué la montée des océans au cours du XX^{e} siècle à l'aide d'un traitement probabiliste (un « filtre de Kalman »). Cette technique leur a permis d'accommoder les données éparses en un modèle global.

Alors qu'ils attendaient une confirmation de l'élévation de 1,5 à 1,8 millimètre par an des précédentes estimations, ils ont découvert avec surprise qu'entre 1901 et 1990, l'océan n'est pas monté de plus de 1,2 millimètre par an. Autrefois, les chercheurs ont trouvé aussi que depuis 1990, il s'élève de 3 millimètres par an. Ce résultat coïncide avec les précédentes estimations, ce qui n'a rien d'étonnant puisqu'à la fin du XX^{e} siècle, l'arrivée des mesures altimétriques par satellite a fait disparaître les biais anciens.

Ainsi, les mers n'ont pas autant monté au XX^{e} siècle qu'on ne le pensait. L'accélération observée depuis n'en est que plus inquiétante.

P. S.

Nature, vol. 517, pp. 481-484, 201

3 mm

C'est l'élévation moyenne des océans par an depuis 1990. La montée des mers est aujourd'hui 2,5 fois plus rapide qu'au XX^{e} siècle.

Tchouri à la loupe

La sonde *Rosetta* offre une vision de plus en plus précise de la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko, surnommée Tchouri. Les informations recueillies par ses instruments ont fait l'objet d'une série de publications dans *Science*. Notamment, la surface de Tchouri toute une variété de structures. Par exemple, certaines falaises dévoilent des amas ovoïdes de trois mètres de diamètre, peut-être les briques qui ont formé la comète en s'agglutinant sous une faible gravité. Par ailleurs, Tchouri est poreuse et constituée surtout de poussière et de glace d'eau. Et sa densité moyenne est d'environ 0,47 gramme par centimètre cube.

Les neurones de la soif

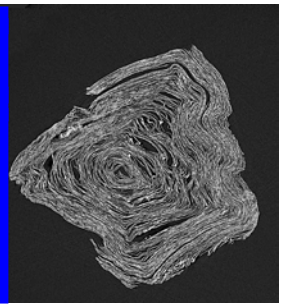
Des neurones qui déclenchent la soif et d'autres qui l'arrêtent : c'est ce qu'ont identifié dans l'hypothalamus de souris Yuki Oka, de l'Institut de technologie de Californie, et ses collègues. Ces chercheurs ont appliqué les techniques d'optogénétique, consistant à rendre certains neurones activables par la lumière. Ils ont alors pu allumer et éteindre les neurones de façon sélective, et ainsi faire s'arrêter ou commencer de boire les animaux, indépendamment de leur état de déshydratation.

Des sucres prébiotiques

Uwe Meierhenrich, de l'Institut de chimie de Nice, et ses collègues ont reproduit en laboratoire les conditions du milieu interstellaire. Sous vide, en irradiant avec de la lumière ultraviolette de la glace d'eau contenant aussi des molécules de méthanol et d'ammoniac, ils ont obtenu des aldéhydes et des molécules proches de sucres. Un pas important pour comprendre les mécanismes de la chimie prébiotique : ces molécules sont des précurseurs des ribonucléotides, des briques élémentaires de la vie.

Philologie

Lire des rouleaux de papyrus sans les dérouler



Le rouleau de papyrus d'Herculanum de Paris n° 4 radiographié en coupe

Pi, eta, pi, tau, omicron, iota, epsilon, c'est-à-dire Π-Ι-Η-Τ-Ο-Ι-Ε sont les premières lettres grecques déchiffrées dans le fragment du papyrus d'Herculanum de Paris n° 4. Autour de Vitello Mocella du CNR (l'équivalent italien du CNRS), une équipe franco-italienne vient de mettre au point un procédé tomographique pour déchiffrer les papyrus d'Herculanum sans avoir à les dérouler.

Ces centaines de *volumens*, qui constituaient la bibliothèque du philosophe épicurien d'origine syrienne Philodème de Gadara (110-40), à Herculanum, sont en effet des livres-rouleaux, c'est-à-dire de longues bandes de papyrus enroulées sur elles-mêmes. Ils sont tout noirs, car ils ont été carbonisés par la chaleur des boues volcaniques vésuviennes qui ont submergé Herculanum en 79 de notre ère. C'est pourquoi les scientifiques cherchent comment les lire sans les détruire.

Au synchrotron européen de Grenoble (l'ESRF), ils ont mené des essais de tomographie X par contraste de phase. Cette technique d'imagerie interférentielle permet de reconstituer des motifs dans l'espace en exploitant les différences de phase optique qu'ils créent (et non des contrastes de densité comme en imagerie par rayons X classique). Selon Daniel Delattre, du CNRS, qui a participé au projet, à terme, quelques heures de faisceau du synchrotron suffiront pour scanner un rouleau.

Nature Comm., en ligne le 20 janvier 201

Insolite

Superhydrophobie extrême

Une goutte d'eau lâchée quelques centimètres au-dessus de cette plaque de métal rebondit sur la surface sans y adhérer. Déposée à la surface, elle glisse même si le plan n'est incliné que de quelques degrés. Chunlei Guo et Anatoliy Vorobyev, de l'Université [illegible] ont les motifs nano- et micrométriques avec un laser à impulsions femtosecondes.

Géophysique

L'histoire de la Terre racontée par son manteau

La subduction (plongée d'une plaque tectonique sous une autre) explique l'hétérogénéité chimique du manteau terrestre, c'est-à-dire la couche de 2 885 kilomètres d'épaisseur située sous la croûte. Depuis qu'ils l'ont compris, il y a plus de 30 ans, les géochimistes cherchent à en savoir plus. Avec des collègues, Morten Andersen, de l'Université de Bristol, a étudié dans ce but les proportions de thorium et d'uranium au sein de divers échantillons de manteau.

Quand ils ont mesuré la valeur du rapport thorium/uranium dans des basaltes issus des îles océaniques, les chercheurs ont trouvé 3,48, soit légèrement moins que la valeur moyenne planétaire. Puisque ces basaltes sont issus de remontées profondes de matière mantellique, ils en concluent que le manteau profond a été légèrement enrichi en uranium par des subductions anciennes.

La datation des roches impliquées montre que cet épisode d'enrichissement s'est produit il y a plus de 2,4 milliards d'années, à l'époque estimée de la « Grande Oxydation », c'est-à-dire de la multiplication des organismes photosynthétiques produisant de l'oxygène. Après l'apparition d'une atmosphère oxygénée, le lessivage des oxydes d'uranium formés en surface a enrichi en uranium les océans et la croûte océanique, qu'une subduction a ensuite introduite dans le manteau.

Pour leur part, les basaltes issus de plaques océaniques actuelles ont un rapport thorium/uranium de seulement 2,44 et sont donc nettement plus riches en uranium. Or ils ne peuvent dater que du dernier cycle tectonique, soit de moins de 600 millions d'années. Selon les chercheurs, la mise en place il y a 600 millions d'années d'océans pleinement oxygénés a favorisé l'enrichissement de la croûte océanique en uranium, de sorte que les subductions récentes ont très fortement enrichi en uranium le manteau supérieur.

Nature, vol. 517, pp. 356-359, 201

Le magma du volcan Anatahan (ici une éruption de 2003), dans l'arc des Mariannes (océan Pacifique) est d'origine profonde et est, de ce fait, moins riche en uranium que la matière du manteau supérieur.

Biophysique

Des oies qui font les montagnes russes sur l'Himalaya

Ces oiseaux migrateurs parcourent des milliers de kilomètres et affrontent parfois la traversée de déserts arides ou de vastes océans. Cependant, très peu d'espèces s'aventurent à traverser le massif himalayen, qui oblige les oiseaux à voler très haut, où l'air est moins dense et où il est donc nécessaire de battre des ailes à une fréquence plus importante. L'oie à tête barrée *(Anser indicus)* est l'une des rares à effectuer ce trajet. Charles Bishop, de l'Université de Bangor, au Pays de Galles, et ses collègues ont suivi certains de ces oiseaux pour comprendre comment ils traversent l'Himalaya.

Quelle stratégie ces oies adoptent-elles ? Volent-elles à une altitude fixe et élevée ou suivent-elles le relief, multipliant ainsi les ascensions et les descentes ? Des études précédentes avaient montré que ces oiseaux suivent plutôt le relief et limitent leurs ascensions à environ 6 000 mètres.

Il restait à estimer si cette stratégie des « montagnes russes » était avantageuse sur le plan énergétique. Pour ce faire, Charles Bishop et ses collègues ont équipé sept oies de plusieurs instruments afin de suivre leur rythme cardiaque, la fréquence de leurs battements d'ailes et leur altitude.

Les chercheurs ont montré que la puissance dépensée pour voler à 5 000 mètres est 1,7 fois plus importante que pour voler au niveau de la mer. En estimant le bilan d'énergie d'une oie qui a volé 15 heures en suivant le relief à environ 60 mètres du sol, ils ont montré que l'oiseau, malgré les phases d'ascension, a dépensé environ 8 % d'énergie en moins que s'il avait volé constamment à l'altitude maximale de son parcours. En outre, l'oie profite de courants d'air ascensionnels lorsqu'elle doit gagner en altitude.

S. B.

C. M. Bishop et al., Science, vol. 347, pp. 250-254, 2015

Lors de sa migration, l'oie à tête barrée franchit le massif himalayen. Elle le fait en suivant le relief, et non en volant à haute altitude.

Astrophysique

Théâtre d'ombres dans un disque protoplanétaire

Le disque de l'étoile HD 142527 présente d'étonnantes zones sombres. À quoi correspondent-elles ? À l'ombre du disque interne, répondent des astronomes chiliens.

L'étoile HD 142527 est un laboratoire à ciel ouvert pour les astronomes qui étudient la formation des systèmes planétaires. Jeune et encore entourée de son disque protoplanétaire de gaz et de poussière, cette étoile avait déjà, en 2013, attiré l'attention de Simon Casassus, de l'Université du Chili à Santiago. Avec ses collègues, il en avait déterminé certaines caractéristiques, mais un aspect restait énigmatique : la partie externe du disque protoplanétaire arbore une atypique forme en fer à cheval dans les longueurs d'onde radio, et deux zones sombres en lumière infrarouge. Simon Casassus et deux jeunes astrophysiciens de son université ont poursuivi l'étude de ce système. Ils viennent de montrer que ces zones sombres sont probablement l'ombre de la partie interne (inclinée) du disque protoplanétaire sur la partie externe.

Comment se forme un système planétaire ? Dans ses grandes lignes, le scénario est assez simple. Une étoile qui vient de naître est entourée d'un disque de gaz et de poussière. Dans ce disque, la matière s'agrège et forme les germes de futures planètes. Ces planétésimaux accumulent la matière située sur leur orbite et creusent ainsi des sillons dans le disque. En quelques millions d'années, les planètes captent une grande part du gaz et de la poussière, et le disque disparaît.

En 2013, Simon Casassus et son équipe ont étudié le disque de HD 142527, dont l'étoile est âgée d'environ un million d'années et distante de 646 années-lumière. Cette relative proximité en fait un objet d'étude privilégié pour comprendre la jeunesse des systèmes planétaires.

Le disque de HD 142527 est composé de trois régions : un disque interne qui s'étend jusqu'à 10 unités astronomiques de l'étoile (une unité astronomique correspond à la distance moyenne Terre-Soleil), suivi d'une zone pauvre en gaz et poussière allant jusqu'à 140 unités astronomiques, puis un disque externe qui s'étale jusqu'à environ 300 unités astronomiques.

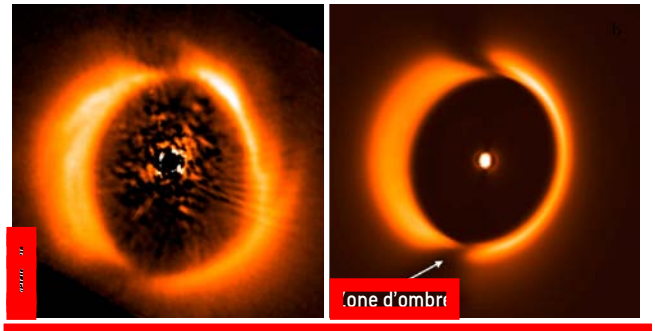
Les astronomes ont découvert des filaments de matière provenant des régions externes et qui traversent le sillon dépourvu de poussière, mais contenant encore du gaz résiduel. Lors de cette étude, ils avaient aussi remarqué que le disque externe ne dessinait pas un anneau complet, mais une sorte de fer à cheval. Cette forme et les filaments s'expliqueraient par la présence de planètes géantes, mais elles n'ont pas encore été détectées.

Des observations dans l'infrarouge ont révélé deux zones sombres presque diamétralement opposées dans le disque externe, zones pourtant non dépourvues de poussière. S'il ne s'agit pas de trous dans le disque, à quoi correspondent-elles ?

Simon Casassus et ses collègues ont imaginé que le disque interne est incliné par rapport au disque externe. Du fait de cette configuration, il projette une ombre sur le disque externe dans deux zones presque opposées.

Cependant, la résolution des images ne permet pas de voir distinctement le centre du système stellaire et de confirmer cette hypothèse. Les astronomes ont donc modélisé le système et la diffusion de la lumière à travers la poussière du disque interne. Si le disque interne est incliné de 70°, la simulation reproduit les zones d'ombre observées dans le disque de HD 142527, qui, en raison de l'épaisseur du disque interne, ne sont pas tout à fait diamétralement opposées.

Le fait que les disques ne soient pas dans le même plan est étonnant, mais cela pourrait être plus fréquent qu'on ne le pensait. Il reste néanmoins à comprendre pourquoi le disque interne est incliné ! La partie la plus proche de l'étoile basculerait au cours de la formation stellaire, sous l'effet de processus à déterminer.



Comparaison entre l'image en infrarouge de l'étoile HD 142527 et de son disque *(à gauche)* et la simulation effectuée par l'équipe de Simon Casassus *(à droite)* qui reproduit bien les zones d'ombre observées.

S. B.

The Astrophysical Journal Letters, vol. 798(2), L44, 2015

Qu'il est beau mon chef

Notre opinion sur les gens est influencée par leur beauté physique, mais l'inverse est-il vrai ? Jugeons-nous quelqu'un plus ou moins beau selon l'opinion que nous avons de lui ? Oui, selon une étude menée par Kevin Kniffin, de l'Université de Cornell, et ses collègues. Les chercheurs ont montré que le chef d'un groupe politique était jugé plus attirant par les adhérents de ce groupe que par ses opposants. Un biais de perception sans doute en partie responsable des romances entre subordonnés et dirigeants.

Peinture néandertalienne à l'ocre

Dans la grotte de Ciorei, en Roumanie, Marin Cârciumaru de l'Université de Valachie et des collègues ont découvert une pierre ronde (une géode) que des Néandertaliens avaient peinte avec de l'ocre rouge. Huit coupes taillées dans la partie supérieure de stalagmites ont par ailleurs été retrouvées dans un niveau archéologique riche en artefacts moustériens, caractéristiques des Néandertaliens. Les chercheurs pensent qu'elles ont servi à préparer la teinture d'ocre, car elles en contenaient des résidus.

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

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

POINT DE VUE

Le bisphénol A n'est pas une affaire classée

Une nouvelle expertise européenne a conclu qu'aux niveaux d'exposition actuels, ce perturbateur endocrinien est sans danger. La situation n'est pourtant pas si rassurante.

Barbara DEMENEIX et Vincent LAUDET

Barbara DEMENEIX codirige l'unité Évolution des régulations endocriniennes (UMR7221 CNRS/MNHN), à Paris.

En janvier dernier, rendant publiques les résultats de son évaluation des risques du bisphénol A (BPA), l'Agence européenne chargée de la sécurité alimentaire (EFSA) a créé la surprise. Elle concluait « qu'aux niveaux actuels d'exposition, le BPA ne présente pas de risque pour la santé des consommateurs de tous les groupes d'âge (y compris les enfants à naître, les nourrissons et les adolescents) ». Dans le même temps, elle recommandait de réduire la dose journalière tolérable de BPA de 50 à 4 microgrammes par kilogramme et par jour (µg/kg/j).

Le bisphénol A est un perturbateur endocrinien, c'est-à-dire une molécule qui peut interférer avec le système hormonal. Utilisé dans la fabrication de plusieurs matériaux – papier thermique, contenants alimentaires en plastique, résines époxy, scellements dentaires, CD... –, il est présent dans les urines à une concentration moyenne de deux à quatre microgrammes par litre.

L'annonce de l'EFSA surprend, car de nombreuses études suggèrent que l'exposition au bisphénol A à de faibles doses peut induire des anomalies de la reproduction et serait impliquée dans le développement des maladies neurodéveloppementales. De fait, le bisphénol A est capable de stimuler les récepteurs des œstrogènes, l'hormone qui contrôle les caractères sexuels secondaires de la femme, ou de moduler l'action des hormones thyroïdiennes, nécessaires au développement du cerveau.

En France et au Canada, le bisphénol A a fait l'objet de régulations strictes et, depuis cette année en France, d'interdictions dans les contenants alimentaires. D'ailleurs l'Anses, l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, a publié en 2013 le résultat d'une expertise mettant en avant « les effets sanitaires du bisphénol A, en particulier pour la femme enceinte au regard des risques potentiels pour l'enfant à naître » et suggérant qu'il faudrait revoir la dose journalière tolérable de bisphénol A.

L'EFSA A ÉCARTÉ LA PLUPART des études suggérant que les effets du BPA sont plus préoccupants qu'on ne le pensait.

Comment deux agences sérieuses, travaillant sur les mêmes données, peuvent-elles avoir des avis différents ? Qui croire ? Et si le bisphénol A est sans danger, pourquoi réduire la dose journalière ? Pour comprendre la situation, il faut revenir sur les procédures d'évaluation des agences. Ces évaluations prennent souvent plus de deux ans et il existe donc en général un hiatus entre les données scientifiques publiées et les résultats des évaluations. Pourtant, dans le cas du bisphénol A et d'autres molécules, ce hiatus est frappant, car de nombreuses études font état d'effets du bisphénol A à des doses bien inférieures à la dose journalière tolérable et que de nouveaux mécanismes d'action du bisphénol A ont été récemment proposés.

Les agences utilisent un cadre conceptuel qui vient de la toxicologie classique, c'est-à-dire de l'étude des poisons. On y considère qu'il existe une relation stricte entre la dose d'exposition et l'effet observé. Si on détermine que la dose la plus faible produisant un effet est 5 mg/kg/j, on considère qu'une exposition à une dose plus faible n'entraîne aucun effet et n'a donc pas de risque associé. Pour se donner une marge de sécurité, on réduit en général la dose minimale admissible d'un facteur 100 (soit 50 µg/kg/j dans notre exemple) et on considère qu'au-dessous, l'exposition est sans risque. Si l'on compare cette dose à l'exposition effective des populations (ce que font les panels de l'EFSA, par exemple) et que l'exposition se révèle à des doses inférieures à cette limite, on conclut que la molécule ne présente pas de danger aux expositions constatées.

Vincent LAUDET dirige l'Institut de génomique fonctionnelle de Lyon (Université de Lyon/CNRS/ENS Lyon)

Mais ce raisonnement ne fonctionne que s'il existe une relation linéaire entre dose et effet. Or peu de signaux hormonaux naturels ont des réponses linéaires. On trouve souvent des plateaux, voire des inversions et des inhibitions de réponses à des doses croissantes. Ainsi, si le mode d'action de la molécule étudiée est complexe, avec des effets plus forts observés aux doses faibles, le raisonnement de la toxicologie classique s'écroule. Or sur le bisphénol A et d'autres perturbateurs endocriniens, nombre d'études contestent la relation linéaire entre dose et effet. Une part de l'explication pour le bisphénol A est qu'il agit *via* au moins deux récepteurs : les récepteurs des œstrogènes ER, qu'il active à des concentrations de 0,2 millimole par litre, et le récepteur ERRγ, qu'il stimule à des concentrations 40 fois inférieures. Si un effet du bisphénol A est activé par ERRγ et réprimé par les ER, il sera plus fort à des concentrations faibles. On n'observera pas d'effet à 50 µg/kg/j, mais à des concentrations 10 ou 100 fois plus faibles.

Pourquoi l'EFSA ne prend-elle pas ces données en compte ? Parce qu'elle ne retient que les publications suivant des procédures strictes, notamment pour le nombre d'animaux utilisés. L'évaluation complète, selon les critères de l'EFSA, des effets du bisphénol A sur les rongeurs nécessite des milliers d'animaux, ce que peu de laboratoires peuvent financer. Ce faisant, l'EFSA a écarté la plupart des études suggérant que les effets du bisphénol A sont plus nombreux et plus préoccupants qu'on ne le pensait.

L'Anses donne un avis différent de l'EFSA parce que certaines études, notamment celles suggérant un effet à des doses faibles sur le cancer mammaire chez la souris, ont été jugées assez préoccupantes pour justifier une alerte. D'ailleurs, l'EFSA a aussi jugé inquiétantes des données et proposé une réduction de la dose journalière tolérable de BPA.

L'avis de l'EFSA semble néanmoins très décalé par rapport aux avancées scientifiques récentes. En restant dans le cadre de la toxicologie classique, en collant de façon trop stricte à la robustesse des études retenues, elle prend le risque de passer à côté d'effets néfastes sur la santé. On peut penser que c'est sans importance puisque, le bisphénol A étant interdit en France, il sera vite retiré du marché. L'exposition baissera donc et le risque diminuera. Toutefois, il sera remplacé par des substituts tel le bisphénol F qui, comme lui, polymérise facilement, mais dont les effets sont mal connus. Si des inquiétudes se font jour sur le bisphénol F et que des mesures de précaution sont demandées, les industriels auront beau jeu de dire que le bisphénol A a été interdit alors que le risque était faible, voire inexistant, et qu'il ne faut donc pas faire de même pour le bisphénol F. L'avis de l'EFSA constitue donc un inquiétant précédent.

Cette situation soulève aussi le problème du financement de ces recherches. Peu d'études financées sur fonds publics atteignent les critères de robustesse exigés par les agences comme l'EFSA ou l'Anses, car ces études sont au moins 30 % plus chères que les études classiques. Ainsi, celles financées par l'industrie chimique sont plus souvent retenues alors même que beaucoup, notamment sur le bisphénol A, sont critiquables sur les situations contrôles, sans bisphénol A, qu'elles utilisent comme témoins dans leurs expériences. Or la pollution au bisphénol A est telle qu'il existe une contamination atmosphérique ubiquitaire qui empêche d'avoir de réels contrôles sans bisphénol A, ce qui rend difficile l'étude des doses faibles.

Il est donc urgent que les pouvoirs publics reprennent ce dossier et financent des études indépendantes exploitables par les experts des agences de façon que tout le spectre d'effets et de modes d'action des polluants environnementaux soit pris en compte. ■

Réagissez au Point de vue sur www.pourlascience.fr

ENTRETIEN

« Si mon blog donne envie de lire un livre de science, c'est gagné ! »

Rencontre avec la célèbre blogueuse et auteure de BD Marion Montaigne, qui nous raconte son travail avec les chercheurs et son envie de diffuser le savoir scientifique avec humour.

Marion Montaigne est l'auteure du blog BD « Tu mourras moins bête » (tumourrasmoinsbete.blogspot.fr)

Le professeur Tournesol, Philip Mortimer, le savant Cosinus… La bande dessinée a toujours eu un lien [illegible] avec la science. Les personnages de savants qui ont ravi des générations de lecteurs. Le neuvième art est même devenu un support pédagogique efficace pour diffuser la science, avec des ouvrages tels que *Logicomix* (A. Doxiàdis *et al.*, 2012), qui évoque l'histoire moderne de la logique, ou *Feynman* (J. Ottaviani et M. Myrick, 2012), biographie du célèbre prix Nobel de physique. Ces dernières années, un nouveau support pour la BD est apparu, le blog. Comme d'autres, Marion Montaigne s'en est emparée afin de partager avec un large public son intérêt pour les sciences. Ses billets de blog sont aussi à découvrir en livres (*Tu mourras moins bête*, Ankama, 2011 et 2012, Delcourt, 2014).

POUR LA SCIENCE
De quand date votre intérêt pour la science ?

MARION MONTAIGNE : Au collège, j'adorais la biologie. En classe, nous avions des vivariums avec des insectes. Nous disséquions des grenouilles et nous pouvions voir ce qu'il y avait dedans. C'était du concret. On ne pouvait pas nous raconter des histoires. Malgré cet intérêt pour la biologie, je me suis orientée vers des études d'art. J'ai fait une préparation à l'Atelier de Sèvres, puis j'ai été à l'École Estienne en section Métiers du livre et je suis entrée à l'École Gobelins pour apprendre l'animation. À Estienne, il existe une formation pour faire de l'illustration scientifique, mais je n'étais ni assez méticuleuse ni assez patiente pour dessiner exactement le bon nombre de côtes d'un squelette ! Je n'avais pourtant pas abandonné ma passion pour la science. Ce doit être un truc d'anxieux : avec la science, j'ai les réponses à mes questions.

PLS
Comment l'idée du blog *Tu mourras moins bête* vous est-elle venue ?

M. M. : Je lisais beaucoup, mais je ne savais pas comment concilier ma passion pour les sciences et mon métier d'illustratrice. À côté de ça, un nouveau support se développait pour les dessinateurs de bande dessinée, les blogs, que chacun peut remplir avec du texte, des photos ou des dessins. Beaucoup de dessinateurs mettaient en scène leur quotidien. Je n'avais pas envie de raconter ma vie et c'est là que l'idée de parler de science est venue : mon blog est né en 2008. Et je ne suis pas la seule à utiliser le dessin pour parler de science ; Jean-Yves Duhoo, par exemple, dessine ses visites de laboratoire dans la revue *Spirou*. À travers chaque billet, j'essaye de transmettre mon émerveillement à la découverte d'un sujet. Aujourd'hui, on nous demande d'être productifs, efficaces. Malgré ces contraintes, la recherche garde une part de magie. Rien ne m'émerveille plus que ce que font les chercheurs au quotidien.

PLS
Comment se déroule la genèse d'un billet ?

M. M. : Au gré de mes lectures, je vois un sujet dans un magazine, dans l'actualité, dans un livre, je m'en empare. Je me documente et je lis d'autres textes sur le sujet. Les gags me viennent spontanément. La difficulté est ensuite de construire une histoire. Cela peut prendre plusieurs semaines. Pour donner du rythme à l'ensemble, l'idéal est d'avoir un gag par information scientifique.

PLS
Abordez-vous tous les domaines ? Y a-t-il des sujets plus difficiles à traiter que d'autres ?

M. M. : J'aime beaucoup la biologie et l'astrophysique. On retrouve donc beaucoup de billets sur ces sujets. La biologie, en particulier. C'est concret, ça parle aux gens. Tout le monde a des

oblèmes de peau, d'acné, etc. Les maths et a physique, c'est plus difficile.

Un me demande souvent de faire des ma-hématiques. J'aime bien mettre des formules, e trouve ça joli. Mais les mathématiques et la hysique font souvent appel à des notions pas orcément connues de tous mes lecteurs. J'es-aye de maintenir un niveau de connaissances équivalent à celui d'un lycéen. Alors, pour faire un billet de mécanique quantique, il faudrait d'abord rappeler ce qu'est un électron. L'intro-duction de mon billet serait lourde et difficile à rendre drôle.

Surtout, il ne faut pas oublier que les gens isent le blog pour se détendre, glaner quelques nformations scientifiques en s'amusant, avant d'aller travailler ou pendant des pauses au travail. Cela ne fonctionnerait pas si le billet devenait un cours de physique !

PLS

Quelles sont vos relations avec les chercheurs ? Les rencontrez-vous, par exemple, lors de visites de laboratoires ?

M. M. : J'ai effectivement eu plusieurs fois l'occasion de visiter des laboratoires. Les chercheurs qui m'accueillent sont souvent très enthousiastes. Ils connaissent mon travail et apprécient que je parle de leurs travaux sur mon blog. J'aime beaucoup ces visites. C'est l'envers du décor. La recherche, ce n'est pas juste des résultats publiés dans des articles, c'est surtout des expériences en tous genres. Et les chercheurs ont vraiment beaucoup d'imagination quand il s'agit de comprendre les animaux ou la nature.

La visite d'un laboratoire est aussi un moment privilégié d'échanges avec les cher-cheurs. C'est l'occasion pour eux de faire pas-ser des messages, de lutter contre des idées toutes faites ou des stéréotypes. Par exemple, on dit souvent que les Japonais sont les plus forts en robotique. Les chercheurs de l'Institut des systèmes intelligents et de robotique, à Paris, vous diront qu'on est très performants en France. Et que Terminator, ce n'est vraiment pas pour demain...

Mais je ne peux pas souvent aller dans les laboratoires. Cela prend du temps. Et les chercheurs sont déjà très pris par leurs tra-vaux, leurs expériences, l'enseignement et leurs

À ÉCOUTER

Le jeudi 26 février 2015, de 14h à 15h, Marion Montaigne deviendra sur les blogs BD scientifiques dans la partie *Actualités* de l'émission **La marche des sciences** sur *France Culture*. www.franceculture.com

âches administratives, en particulier pour rouver des financements.

PLS

Les chercheurs vous ident-ils pour vos billets ? n vérifient-ils le contenu ?

M. M. : Quand je visite un laboratoire, oui, en général, je leur envoie le billet. Dans les autres cas, ça dépend. Lors d'une dédicace, j'ai rencontré un astrophysicien avec qui je suis restée en contact et à qui je pose des questions quand le sujet porte sur son domaine. En biologie, je connais un médecin urgentiste que je consulte régulièrement.

Mais faire relire, c'est toujours un peu com-pliqué. Il faut trouver le juste équilibre entre exactitude et concision. C'est très difficile d'être concis et drôle quand on me demande de rem-placer « cerveau » par « cortex préfrontal », qui aurait été plus exact. Le lecteur a juste besoin de savoir que l'action se passe dans le cerveau pour comprendre l'idée, même si cela reste vague. En général, cela se passe bien. Mes relecteurs comprennent l'équilibre que j'essaye de garder dans mes billets.

PLS

Les chercheurs connaissent votre blog, mais votre public est beaucoup plus vaste. Qui est-il ?

M. M. : Parmi mes lecteurs, on trouve beaucoup de trentenaires, des gens de mon âge. Probablement

parce que dans le premier tome du blog en livre, j'ai utilisé de nombreuses références tirées de films des années 1990, des clins d'œil qui parlent surtout à ces trentenaires. Mais ils ne sont pas les seuls à venir lire les aventures du professeur Moustache. Des jeunes visitent le blog soit parce que leurs parents le lisent, soit parce que des enseignants utilisent mes dessins en cours.

Les lecteurs n'ont pas tous une formation scientifique, bien au contraire. Mais ils sont curieux et veulent tous apprendre des choses de façon ludique. Le blog répond à cette attente. Les billets qui ont eu le plus de succès sont ceux qui touchent au quotidien. « Pourquoi les filles ne veulent pas toucher la lunette des toilettes ? » est un bon exemple. Chacun de nous se pose la question, mais personne n'ose demander. Pourtant, tout le monde ira lire la réponse sur le blog. On me reproche un peu mon humour scatologique, mais ce doit être un effet d'attirance-répulsion, car ce sont les sujets qui marchent. Et si je parle de sexe, alors là...

D'autres réactions sont parfois étonnantes. Certains m'écrivent pour se plaindre que le blog se veut « scientifique », mais qu'il est complètement « fantaisiste ». Pourtant, vu les dessins, je ne pense tromper personne sur le contenu du blog. Les lecteurs semblent réclamer une restitution parfaite de la science. Cela deviendrait alors trop compliqué. Un doctorant que j'ai rencontré m'a dit que « simplifier, c'est déjà être dans le faux ». Vulgariser la science est un exercice difficile, il faut savoir placer le curseur au bon endroit.

PLS

Que pensez-vous de la vulgarisation scientifique en France ? On parle souvent de désaffection pour la science. Or votre blog semble prouver le contraire.

M. M. : Pour moi, la vulgarisation scientifique est une histoire de strates. Mon blog est au niveau de ce qu'un lycéen apprend en cours. Il est séparé du niveau des spécialistes par un grand nombre de strates qu'il s'agit de gravir par différents moyens. Si mon blog donne envie à quelqu'un de lire un livre de science pour approfondir un sujet, c'est gagné ! C'est pour cette raison que je donne beaucoup de références bibliographiques dans le blog.

Les acteurs plus classiques de la diffusion de la science sont les journalistes scientifiques et les chercheurs. Une chose qui me surprend est la différence de traitement de la science à la télévision en France et en Angleterre. La BBC, par exemple, fait de très bons documentaires scientifiques. En France, c'est plus rare et les émissions scientifiques sont souvent destinées aux enfants. L'émission *On n'est pas que des cobayes* sur France 5 invite des chercheurs pour faire des expériences. Elle est bien faite et montre que les scientifiques ne sont pas tous de vieux messieurs en blouse blanche. Elle donne envie aux enfants d'être curieux, voire suscite des vocations chez eux. C'est dommage de ne pas avoir d'équivalent pour les adultes.

« Rien ne m'émerveille plus que ce que font les chercheurs au quotidien. »

PLS

Et les chercheurs, justement, que pensez-vous de leur rôle dans la vulgarisation ?

M. M. : J'ai l'impression qu'à une époque, c'était mal vu de faire de la vulgarisation pour un chercheur. Peut-être qu'aujourd'hui encore, si l'on ne voit pas beaucoup de chercheurs à la télévision, c'est parce qu'il y a une certaine réticence à parler de son travail sur ce média. En 2014, j'ai été invitée à une conférence au Québec de l'Association francophone pour le savoir, qui portait sur la diffusion de la connaissance. Une des conclusions était que les scientifiques ne communiquent pas assez sur leur métier, leurs recherches ou leurs découvertes. Les jeunes chercheurs que je rencontre ont envie de partager leur savoir, d'expliquer des choses. Certains le font d'ailleurs très bien. Mais comme je le disais, ils manquent de temps pour assurer à la fois leurs travaux de recherche, leurs enseignements et les tâches administratives. C'est souvent leur investissement dans la diffusion du savoir qui en pâtit.

PLS

Ainsi, votre blog comble peut-être un vide ?

M. M. : Je ne sais pas s'il comble un vide, mais il répond à une attente claire : les gens veulent être émerveillés et apprendre en s'amusant.

Le phénomène est récent pour une raison principale : Internet. Sans cet outil, je n'aurais jamais pu établir le contact aussi simplement avec des chercheurs. Et c'est une mine d'informations quasi illimitée dans laquelle les dessinateurs peuvent puiser leurs idées. ■

Propos recueillis par Sean BAILLY et Marie-Neige CORDONNIER

Lu sur SciLogs
Les blogs scientifiques de Pour la Science

Quelles zébrures pour le zèbre ?

par Jean-Louis Hartenberger, sur *Histoires de mammifères*

Chez les zèbres, il n'y a pas que 50 nuances de gris. Si le noir et le blanc suffisent à construire une identité pour chacun, cela ne donne pas lieu à 50, mais à des myriades de robes différentes. Par la largeur des rayures, de leurs arabesques et contours, des pleins et déliés qu'elles dessinent, de la densité des diverticules parfois sinueux des raies, cet uniforme est loin de l'être. Alors pourquoi est-il des zèbres plus clairs que d'autres (à moins que ce ne soit l'inverse) ? Parfois ce sont leurs pattes qui sont plus claires, mais la robe de l'échine peut aussi être plus ou moins sombre.

Ces questions ne datent pas d'hier. A l'issue de longues études sur les populations de zèbres de plaine que l'on rencontre depuis le Cap jusqu'en Afrique centrale, dans des environnements variés, une équipe dirigée par Brenda Larison, de l'Université de Californie à Los Angeles, vient de rendre son verdict. Ce ne sont pas encore des certitudes, mais il semble que les raies du zèbre participent à sa régulation thermique, et que leur largeur varie en fonction du climat où l'animal vit.

Reconnaissons d'abord que la robe du zèbre a du chic. Mais aussi seyant soit-il, un costume doit être pratique, de bon usage, et surtout bien adapté à l'environnement fréquenté. Pour les zèbres, c'est d'abord le décor végétal où ils vivent et doivent se fondre, car ils ne sont pas les seuls à courir la savane. Il y a tous ceux qui aimeraient bien les croquer, et aussi ces nuées d'insectes piqueurs gourmands de leur sang. Alors ces rayures noires et blanches sont-elles une tenue de camouflage qui permet de se fondre dans le paysage autant qu'elle déroute prédateurs grands et petits ?

Quand on se pose ce genre de question, on a une petite idée derrière la tête.

La robe des zèbres présente de riches variations. Elles seraient corrélées avec la température de la région où ils vivent

Et depuis longtemps déjà, on a remarqué que les variations de la robe du zèbre dans les espaces qu'il parcourt sont graduelles du Sud au Nord. Les rayures des populations qui vivent près du Cap sont moins marquées. Elles gagnent en densité à mesure que l'on se rapproche de l'équateur. On soupçonne donc une grande influence de la température.

Cependant, d'autres données environnementales varient elles aussi du Sud au Nord. Aussi les chercheurs ont-ils réalisé des simulations qui prennent en compte dans 29 sites la température locale et d'autres paramètres : pression de prédation exercée par les lions, densité des insectes piqueurs, en particulier la mouche tsé-tsé, épaisseur du couvert végétal, etc.

Il s'avère que les plus pertinentes pour rendre compte des observations sont la température locale moyenne et autres données thermiques. Cela semble indiquer que les raies plus ou moins denses du zèbre lui permettent de maintenir la surface de son corps à une température d'environ 29,2 °C, alors que dans les mêmes conditions, chez les autres herbivores, la température s'élève à 35,5 °C.

Il s'agit là de résultats préliminaires : il faudra les compléter par des études plus précises sur la physiologie de la thermorégulation du zèbre, en particulier tester si les raies du pelage et les réseaux sanguins capillaires du derme se superposent, et quel mode de ventilation rafraîchit l'animal.

Il semble par ailleurs que courir en plein soleil dope l'énergie et la vigueur de ces champions du galop en habit de soirée. Quel est le secret de ces coureurs à pied ? ■

Jean-Louis HARTENBERGER, paléontologue spécialiste de mammifères, est l'auteur du blog Histoires de mammifères (www.scilogs.fr/histoires-de-mammiferes/).

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

HOMO SAPIENS INFORMATICUS chronique de Gilles Dowek

Aplatir ou applatir ?

Avec le Web et les moteurs de recherche, tout un chacun pourrait faire des mesures lexicographiques. L'apprentissage de l'orthographe en bénéficierait.

Les enfants apprennent dans les dictionnaires que l'amphitryon prodigue des *cuisseaux* de veau mais des *cuissots* de chevreuil. Ils s'interrogent parfois sur les raisons d'être de telles particularités orthographiques. Les lexicographes, qui écrivent ces dictionnaires, avancent d'ordinaire deux types de raisons, les unes liées au passé de la langue, les autres à son présent.

Raisons liées au passé : les dictionnaires perpétuent une tradition et rappellent, par l'orthographe, l'étymologie des mots. Ainsi, contrairement à l'italien qui écrit *farmacia*, le français écrit *pharmacie*, parce que ce mot s'écrivait ainsi par le passé et pour rappeler qu'il vient du grec φαρμακον.

Raisons liées au présent : les dictionnaires ne font que décrire l'orthographe la plus courante des mots – ils indiquent l'orthographe *pharmacie*, et non *farmacie*, parce que c'est ainsi que nous écrivons habituellement ce mot.

Les raisons liées à l'histoire de la langue sont difficiles à soutenir, car, loin d'être des bastions de conservatisme, les dictionnaires évoluent très rapidement, pour suivre les transformations de la langue. Si le mot *dictionnaire*, par exemple, prend deux *n*, ce n'est sans doute pas par respect de la tradition, puisque le latin médiéval *dictionarium* n'en prenait qu'un seul.

De ce fait, on présente souvent les dictionnaires comme étant d'abord des descriptions de l'état de la langue telle qu'elle est utilisée. Le *Petit Robert* se considère ainsi comme un « observateur objectif » de la langue. Si la lexicographie est, à l'instar de l'astronomie, une science d'observation, nous devons alors nous poser la question du meilleur instrument à utiliser pour observer objectivement la langue.

La récente constitution du plus grand corpus de l'histoire, le Web, et la mise à disposition de tous d'outils permettant de le sonder changent la situation, car la lexicographie peut désormais s'automatiser, au moins partiellement.

Le Web et les outils permettant de le sonder changent la situation : la lexicographie peut désormais s'automatiser.

Selon les dictionnaires, les verbes *apostropher*, *aplanir*, etc. prennent un seul *p*. Comme attendu, le moteur de recherche *Google* nous apprend que seulement 1 % des occurrences de *apostropher*, dans les pages web en français, comportent deux *p*, et ce taux reste faible pour *aplanir*, *apercevoir* et *apaiser*. Mais il est de 7 % pour *capitoyer*, de 8 % pour *apeurer* et de plus de 10 % pour *aplatir*.

On peut en déduire que 10 % des utilisateurs du verbe *aplatir* se trompent, ou alors que les dictionnaires se trompent quand ils affirment que ce verbe n'a qu'une orthographe courante. Pour comparaison, le *Petit Robert* donne deux orthographes pour le mot *chariot*, mais moins de 3 % des occurrences du mot *chariot* sur le Web comportent deux *r*.

Pour interpréter ces mesures, il faut se rappeler que les théories sur le comportement humain modifient souvent ce comportement. En particulier, de nombreux scripteurs utilisent un dictionnaire ou un correcteur orthographique, qui influe sur leur orthographe. Si, par exemple, la moitié des scripteurs se servent d'un correcteur orthographique, il s'ensuit que plus de 20 % de ceux qui n'en utilisent pas écrivent *aplatir* avec deux *p*. Il serait d'ailleurs intéressant d'observer l'évolution de ces mesures, si jamais les dictionnaires et les correcteurs orthographiques admettaient demain deux orthographes pour le verbe *aplatir*.

Cette popularisation de la lexicographie suggère aussi de nouvelles façons d'enseigner l'orthographe. Quand un élève demande à son professeur quelle est l'orthographe correcte, c'est-à-dire la plus courante, d'un mot, l'enseignant, au lieu d'une réponse dogmatique, pourrait, avec l'humilité d'un professeur de sciences, lui proposer de faire lui-même la mesure. L'apprentissage de l'orthographe étant la matrice de beaucoup d'apprentissages futurs, c'est tout notre rapport à la connaissance qui en serait changé. ■

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

Objets D'ici & D'ailleurs

Bijoux solaires

Météorites

Cadrans solaires

Montres solaires

Bijoux Solaires

bijouxsolaires.com

La Clef des ETOILES

Boutique à Toulouse
& sur internet

laclefdesetoiles.com

Votre spécialiste du matériel d'observation astronomie & nature

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

CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES par Gérald Bronner

L'extension du domaine de la crédulité

Grâce à la rapidité de la circulation des messages sur Internet, les théories du complot prolifèrent.

Les attentats de janvier 2015 en France ont bouleversé très au-delà de nos frontières. Ils ont suscité une masse de commentaires – un des symptômes de l'importance de l'événement. L'un des aspects qui ont frappé les commentateurs a pu paraître plus anecdotique, étant donné la gravité des faits, mais il n'en est pas moins révélateur des grandes transformations de l'époque : le jour même des attentats, certaines théories du complot ont commencé à se répandre.

Par théorie du complot, il faut entendre simplement une interprétation des faits qui conteste la version officielle. Ainsi, on a pu lire sur les réseaux sociaux et certains sites coutumiers de ce type de mythologies que ces horribles crimes n'ont certainement pas été commis par ceux que l'on a accusés et certainement pas pour les raisons qu'on leur a attribuées. Pour étayer leur croyance, des internautes ont mis en exergue des faits qui leur paraissaient étranges. Par exemple, les rétroviseurs de la voiture que conduisaient les auteurs de la tuerie à *Charlie Hebdo* avaient changé de couleur sur certaines photos, François Hollande était arrivé si vite sur les lieux que cela prouve qu'il savait ce qui allait se passer, etc.

Aucun de ces arguments n'est solide, mais grâce à cette intelligence en essaim qui caractérise le travail collaboratif sur Internet, ils deviennent rapidement nombreux et intimidants. Ainsi, de nombreux sites relayaient, après quelques jours, des dizaines de points suspects selon eux. Prenons l'un d'entre eux au hasard : le changement de couleur des rétroviseurs. Il ne s'agit pas là d'un grand mystère, certains observateurs ont fait remarquer à juste titre que les rétroviseurs étant chromés, leur couleur apparente pouvait changer selon la luminosité extérieure et l'angle de prise de vue.

Internet rend plusieurs services à la crédulité contemporaine. D'abord, il dérégule le marché de l'information et il permet aux mythologies conspirationnistes de se répandre facilement, ce qui n'était pas le cas auparavant. Ensuite, par le jeu de la collaboration des croyants motivés, il offre à ces mythologies une forme de plus en plus performante et intimidante, que l'on pourrait appeler un « millefeuille argumentatif ».

Enfin, et c'est un point essentiel, il accélère la diffusion de ces histoires qui, auparavant, ne se déployaient que par le bouche à oreille. Or ce vieux média a ses contraintes. D'une part, il s'appuie sur la mémoire humaine qui est limitée ; d'autre part, il lui faut beaucoup de temps pour diffuser ses messages. Ainsi, quand le récit conspirationniste évoque des événements qui n'intéressent plus personne au moment où il se diffuse, il tend naturellement à disparaître par la sélection qu'exerce l'économie de l'attention.

Avant l'apparition d'Internet, seuls les événements très importants ou médiatiques (a-t-on marché sur la Lune ? Qui a assassiné le président Kennedy ? Comment Marilyn Monroe est-elle morte ? Etc.) pouvaient fournir des mythes du complot susceptibles de survivre à une telle sélection. Grâce à la célérité de l'information sur la Toile, l'imaginaire peut à présent se saisir d'événements plus modestes.

Ainsi, la mort du PDG de *Total*, Christophe de Margerie, ou celle de l'ancien directeur de *Sciences Po*, Richard Descoings, ont donné lieu à leur cortège de théories du complot, ce qui n'aurait pas été le cas avant l'ère d'Internet. On assiste donc à une extension du domaine de la crédulité.

Cette extension est fascinante dans la mesure où elle coexiste avec un progrès constant de la connaissance scientifique et une hausse du niveau d'études. Mais elle est aussi inquiétante parce que toutes ces fables peuvent s'agréger pour former un méta-récit inspiré par la méfiance, voire la haine de certains groupes ou communautés, ce qui ne présage rien de bon pour le vivre-ensemble. ■

GRÂCE À INTERNET, les théories conspirationnistes fleurissent, et pas seulement pour des événements de grande importance tels que le 11-Septembre.

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

Offre PASSION

POUR LA SCIENCE

Le magazine mensuel
***Pour la Science* (12 nos)**

+

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

76€ seulement
1 AN - 16nos

VOS AVANTAGES ABONNÉ

- ✔ **26 % d'économie et plus** par rapport au prix en kiosque
- ✔ L'envoi des magazines **en avant-première**
- ✔ La garantie de ne **manquer aucun numéro**

BULLETIN D'ABONNEMENT

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

POUR LA SCIENCE

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

❑ **1 an • 16 numéros • 76 €** au lieu de ~~102,70€~~ **26 % de réduction !**

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

❑ **2 ans • 32 numéros • 143 €** au lieu de ~~205,40€~~ **+ de 30 % de réduction !**

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

Le mensuel + Le trimestriel

J'indique mes coordonnées

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

_____

_____

CP : _____ Ville _____

Pays : _____ Tél. : _____

(pour le suivi client (facultatif))

Je choisis mon mode de règlement

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

❑ Par carte bancaire

Numéro de carte _____

Date d'expiration _____ / _____

Clé _____

(les 3 chiffres au dos de votre CB)

Signature obligatoire

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

_____ @ _____

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

PLS449J

Des exoplanètes plus accueillantes que la Terre

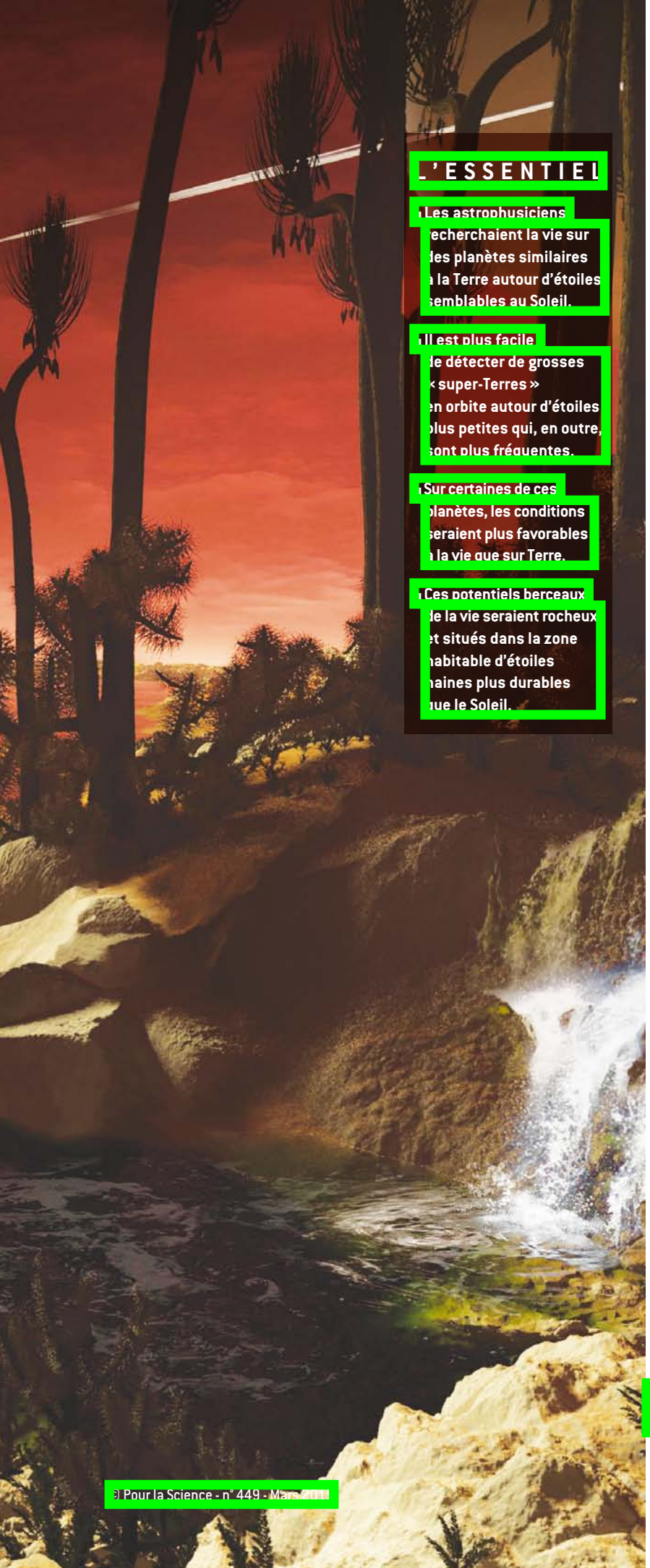
Sur des planètes un peu plus grosses que la nôtre et en orbite autour d'étoiles plus petites que le Soleil, la vie trouverait des conditions plus favorables que sur Terre. De tels mondes existeraient par milliards

René Heller

Habitons-nous le meilleur des mondes possibles ? Au XVII[e] siècle, le philosophe allemand Leibniz pensait que la Terre offrait les conditions optimales pour la vie malgré ses défauts apparents. L'idée a été critiquée, en particulier par Voltaire dans son conte philosophique *Candide*, car il y voyait une construction non scientifique de la réalité pour satisfaire les désirs de Leibniz. La pensée du philosophe allemand trouve néanmoins un écho indirect chez les astronomes qui prennent la Terre comme étalon dans leurs études des planètes extrasolaires et dans la recherche d'autres mondes habitables.

Parce que nous ne connaissons qu'un monde habité (le nôtre), il est naturel d'utiliser la Terre comme référence pour chercher de la vie ailleurs, que ce soit sur Mars ou sur Europe, lune de Jupiter qui présenterait un océan d'eau liquide sous sa surface glacée. Mais aujourd'hui, la découverte de planètes potentiellement habitables en orbite autour d'étoiles autres que le Soleil (autrement dit, des exoplanètes) remet en cause cette approche géocentrique.

Durant ces 20 dernières années, les astronomes ont découvert plus de 1800 exoplanètes et les statistiques suggèrent que la Galaxie en abrite au moins 100 milliards. Parmi les planètes découvertes à ce jour, la plupart sont très différentes de la Terre et exhibent une grande diversité de tailles, d'orbites, de compositions ou de nature de leurs étoiles hôtes (souvent plus petites et plus froides que le Soleil). En regardant de près les caractéristiques de ces exoplanètes, je pense (et je ne suis pas le seul) que la Terre pourrait ne pas être le *nec plus ultra* en termes d'habitabilité. Le fait que la vie y soit apparue ne suffit pas pour affirmer que les conditions y sont optimales. En fait, certaines exoplanètes très différentes de la Terre auraient de bien meilleures chances de développer et de conserver des biosphères stables. Ces « planètes superhabitables » seront les cibles les plus propices pour rechercher de la vie hors du Système solaire.



L'ESSENTIEL

- Les astrophysiciens recherchaient la vie sur des planètes similaires à la Terre autour d'étoiles semblables au Soleil.
- Il est plus facile de détecter de grosses « super-Terres » en orbite autour d'étoiles plus petites qui, en outre, sont plus fréquentes.
- Sur certaines de ces planètes, les conditions seraient plus favorables à la vie que sur Terre.
- Ces potentiels berceaux de la vie seraient rocheux et situés dans la zone habitable d'étoiles naines plus durables que le Soleil.

Bien sûr, la Terre a plusieurs caractéristiques qui, au premier abord, semblent idéales pour la vie. Elle tourne autour d'une étoile d'âge moyen plutôt tranquille, qui brille avec constance depuis des milliards d'années, ce qui a laissé le temps à la vie d'apparaître et d'évoluer. Elle a des océans d'eau liquide, berceaux de la vie, parce qu'elle est en orbite dans la « zone habitable », une mince région autour du Soleil où la lumière reçue de l'étoile n'est ni trop intense ni trop faible. Plus proche du Soleil, la Terre aurait été très chaude et l'eau n'aurait été présente qu'à l'état de vapeur ; si elle était plus éloignée, l'eau n'aurait été que de la glace.

La Terre a par ailleurs une taille propice à la vie : assez grosse pour retenir une atmosphère épaisse grâce à son champ gravitationnel, mais assez petite pour garantir que la gravité ne plaque pas sur la planète un manteau opaque et étouffant de gaz. La taille de la Terre et sa composition rocheuse favorisent aussi l'habitabilité par d'autres aspects, comme la présence d'une activité tectonique, qui régule le climat en participant au cycle du dioxyde de carbone, et celle d'un champ magnétique, qui protège la biosphère du rayonnement cosmique.

La Terre, un berceau médiocre pour la vie

Cependant, plus les chercheurs étudient l'habitabilité de la Terre, moins elle leur semble idéale. Les conditions sont très variables d'une région de la planète à l'autre et de vastes portions de la surface de la Terre sont presque dépourvues de vie : les déserts sont arides, l'océan du grand large est pauvre en nutriments et les régions polaires sont glaciales.

Par ailleurs, l'habitabilité de la Terre a varié dans le temps. Par exemple, durant l'essentiel de la période géologique du Carbonifère (il y a entre 360 et 300 millions d'années environ), l'atmosphère de la planète était plus chaude, plus humide et beaucoup plus riche en oxygène qu'aujourd'hui. Les crustacés, les poissons et les coraux bâtisseurs de récifs prospéraient dans les mers, de vastes forêts recouvraient les continents,

SUR UN MONDE SUPERHABITABLE en orbite autour d'une étoile naine, le paysage différerait de celui de la Terre. Le relief serait assez plat et les plantes seraient sombres, afin de mieux capter la lumière de l'astre.

es insectes et autres animaux terrestres atteignaient des tailles gigantesques. La Terre de l'ère carbonifère abritait probablement plus de biomasse que la planète d'aujourd'hui. On peut donc considérer la Terre actuelle comme moins hospitalière qu'à certaines époques passées.

De plus, nous savons que la Terre est amenée à devenir beaucoup moins accueillante. Dans environ cinq milliards d'années, le Soleil aura épuisé la majeure partie de son combustible, l'hydrogène, et l'hélium de son cœur commencera alors à fusionner. Cette réaction libérant une puissance plus importante que la fusion de l'hydrogène, l'étoile gonflera pour devenir une « géante rouge ». L'astre grossira tant qu'il engloutira peut-être la Terre. Mais la vie sur Terre aura disparu longtemps avant. Alors que le Soleil puisera dans ses dernières réserves d'hydrogène, la température de son cœur augmentera progressivement, et la luminosité totale du Soleil s'accroîtra lentement, d'environ dix pour cent tous les milliards d'années. Un tel changement signifie que la zone habitable du Système solaire n'est pas statique, mais dynamique : elle s'éloignera de plus en plus de l'étoile au fil du temps, et la Terre en sortira.

Des calculs récents suggèrent que la Terre d'aujourd'hui ne se trouve pas au milieu de la zone habitable, mais plutôt sur son bord interne : elle est déjà à la limite de la surchauffe *(voir l'encadré page 30)*. Par conséquent, d'ici environ 500 millions d'années, le rayonnement solaire sera assez fort pour imposer un climat très chaud qui menacera la survie des organismes complexes de la surface terrestre. Dans 1,75 milliard d'années, la température sera si élevée que les océans s'évaporeront, et toute forme simple de vie subsistant encore à la surface disparaîtra.

Ainsi, l'habitabilité de la Terre diminue depuis longtemps et la biosphère se rapproche de sa fin. Tout bien considéré, il est raisonnable de dire que la Terre n'est plus que marginalement habitable.

En 2012, je travaillais sur l'habitabilité de lunes massives en orbite autour de planètes gazeuses géantes. Je me suis alors demandé si d'autres astres pouvaient être encore plus adaptés à la vie que la Terre. Dans le Système solaire, la plus grosse lune est Ganymède, satellite de Jupiter dont la masse est seulement 2,5 % de celle de la Terre. C'est insuffisant pour retenir une atmosphère comparable à celle de la Terre, mais j'ai compris qu'il existe des scénarios plausibles pour la formation de lunes d'une masse approchant celle de la Terre dans d'autres systèmes planétaires. Ces lunes de taille terrestre seraient en orbite autour de planètes géantes situées dans la zone habitable de leur étoile. Elles pourraient alors avoir une atmosphère épaisse.

Des exolunes chauffées par les forces de marée

Pourquoi ces « exolunes » massives seraient-elles plus habitables que la Terre, ou superhabitables ? Contrairement à la vie terrestre, qui a pour principale source d'énergie le rayonnement solaire, la biosphère d'une exolune superhabitable pourrait non seulement tirer son énergie de son étoile, mais aussi de la lumière réfléchie et du rayonnement infrarouge émis par sa planète géante voisine. Il faut y ajouter l'influence gravitationnelle de la planète. Quand une lune tourne autour d'une planète géante, les forces de marée déforment périodiquement sa croûte, d'où une friction qui chauffe la lune de l'intérieur. Ce chauffage par les marées est probablement à l'origine des océans dont on soupçonne l'existence sous la surface gelée d'Europe (lune de Jupiter) et d'Encelade (lune de Saturne).

Cette diversité de sources énergétiques serait toutefois à double tranchant pour une exolune massive. Il suffirait d'un léger déséquilibre des sources d'énergie complémentaires pour faire basculer tout un monde dans un état inhabitable.

Aucune exolune, habitable ou non, n'a encore été détectée avec certitude, mais certaines pourraient se cacher dans les données en cours d'analyse du télescope spatial *Kepler*. Pour l'instant, l'existence et la possible habitabilité de ces objets restent du domaine de la spéculation.

En revanche, des planètes superhabitables se trouvent peut-être déjà dans notre catalogue d'exoplanètes confirmées ou en cours de confirmation. Les premières exoplanètes découvertes au milieu des années 1990 étaient toutes des géantes gazeuses, de masse comparable à celle de Jupiter, et dont l'orbite était bien trop proche de l'étoile pour abriter une quelconque forme de vie. Mais les astronomes ayant peu à peu amélioré les techniques de détection d'exoplanètes, ils ont découvert des planètes de plus en plus petites et sur des orbites plus clémentes car plus

L'AUTEUR

René HELLER est chercheur postdoctorant à l'Institut Origins de l'Université McMaster dans l'Ontario (Canada), et membre du Programme canadien de formation à l'astrobiologie.

BIBLIOGRAPHIE

R. Heller et J. Armstrong, **Superhabitable worlds,** *Astrobiology*, vol. 14(1), pp. 50-66, 2014.

A. J. Rushby *et al.*, **Habitable zone lifetimes of exoplanets around main sequence stars,** *Astrobiology*, vol. 13(9), pp. 833-849, 2013.

R. Heller et R. Barnes, **Exomoon habitability constrained by illumination and tidal heating,** *Astrobiology*, vol. 13(1), pp. 18-46, 2013.

D. Spiegel *et al.*, **Habitable climates : the influence of obliquity,** *Astrophysical Journal*, vol. 691(1), pp. 596-610, 2009.

éloignées de leur étoile. La plupart des planètes identifiées ces dernières années sont ce que l'on nomme des super-Terres, des planètes jusqu'à dix fois plus massives que la nôtre et de rayon compris *grosso modo* entre celui de la Terre (6 371 kilomètres) et celui de Neptune (24 622 kilomètres). Ces planètes sont très répandues autour d'autres étoiles, mais nous n'avons rien de tel dans le Système solaire.

Les plus grosses super-Terres sont probablement dotées d'atmosphères épaisses, ce qui en fait plutôt des « mini-Neptunes » que des versions agrandies de la Terre. Mais certaines parmi les plus petites, peut-être jusqu'à deux fois plus massives que la Terre, auraient des compositions riches en fer et en roches, voisines de celle de la Terre. L'eau liquide pourrait abonder à leur surface si elles sont en orbite dans la zone habitable de leur étoile.

Nous savons aujourd'hui qu'un certain nombre de super-Terres potentiellement rocheuses tournent autour d'étoiles « naines de type M » ou « naines de type K », astres plus petits et moins brillants que le Soleil, mais dont la longévité est bien supérieure. En partie en raison de la durée de vie de leurs étoiles, ces grosses planètes sont actuellement les meilleures candidates au titre de monde superhabitable, comme je l'ai montré dans de récents travaux avec John Armstrong, physicien à l'Université d'État de Weber, dans l'Utah.

La longévité de l'étoile, un avantage

Notre idée s'est construite autour de la grande longévité comme critère essentiel de la superhabitabilité. Une biosphère planétaire a en effet peu de chances de survivre à la mort de son étoile. Le Soleil, âgé de 4,6 milliards d'années, se trouve à peu près à la moitié de son espérance de vie de 10 milliards d'années. S'il avait été un peu plus petit, il aurait été une étoile naine de type K, à la durée de vie bien supérieure. Ces étoiles naines ont moins de combustible nucléaire que les étoiles plus massives, mais les réactions se déroulant en leur cœur ont un meilleur rendement : l'hydrogène est consommé plus lentement, ce qui accroît la longévité de l'astre. Nous avons catalogué de nombreuses naines de type K qui sont des milliards d'années plus âgées que le Soleil et qui brilleront encore des milliards d'années après la mort de ce dernier. Une telle longévité augmente les chances que la vie apparaisse et toute biosphère disposerait ainsi de beaucoup plus de temps pour évoluer et se diversifier.

La lumière d'une naine de type K apparaîtrait plus rouge que celle du Soleil, car elle serait davantage décalée vers l'infrarouge. La photosynthèse resterait possible à la surface de la planète malgré cette plage spectrale décalée, mais la végétation serait probablement plus sombre que sur Terre, afin d'absorber le maximum de rayonnement stellaire.

Le cas des naines de type M n'est pas aussi favorable, alors qu'elles sont encore plus petites et économes que les naines de type K. Elles peuvent briller durant des centaines de milliards d'années, mais elles brillent si faiblement que leur zone habitable est très proche de l'étoile. Cela expose les planètes qui s'y trouvent à de puissantes éruptions stellaires et à d'autres effets indésirables. Avec une plus grande longévité que le Soleil et une zone habitable sans risque, les naines de type K offrent le compromis idéal pour la superhabitabilité.

Certaines de ces étoiles à longue durée de vie pourraient abriter des super-Terres rocheuses depuis plusieurs milliards d'années. Une biosphère pourrait avoir vu le jour dans ces systèmes planétaires bien avant la naissance du Soleil, prospérant et évoluant pendant des milliards d'années avant que la première biomolécule n'émerge de la soupe primordiale de la jeune Terre.

Je suis fasciné par la possibilité que l'activité de la biosphère modifie son environnement, renforçant peut-être au passage l'habitabilité de la planète, comme cela a été le cas sur Terre. Par exemple, il y a environ 2,4 milliards d'années, notre planète a connu la « Grande Oxydation », une période où d'importantes quantités d'oxygène ont commencé à s'accumuler dans l'atmosphère, probablement en raison du métabolisme des algues océaniques. Cela a conduit à l'apparition d'organismes plus gourmands en énergie, de plus grande taille, plus durables et plus actifs, et a constitué une étape cruciale vers l'émergence progressive de la vie hors des océans et la colonisation des continents.

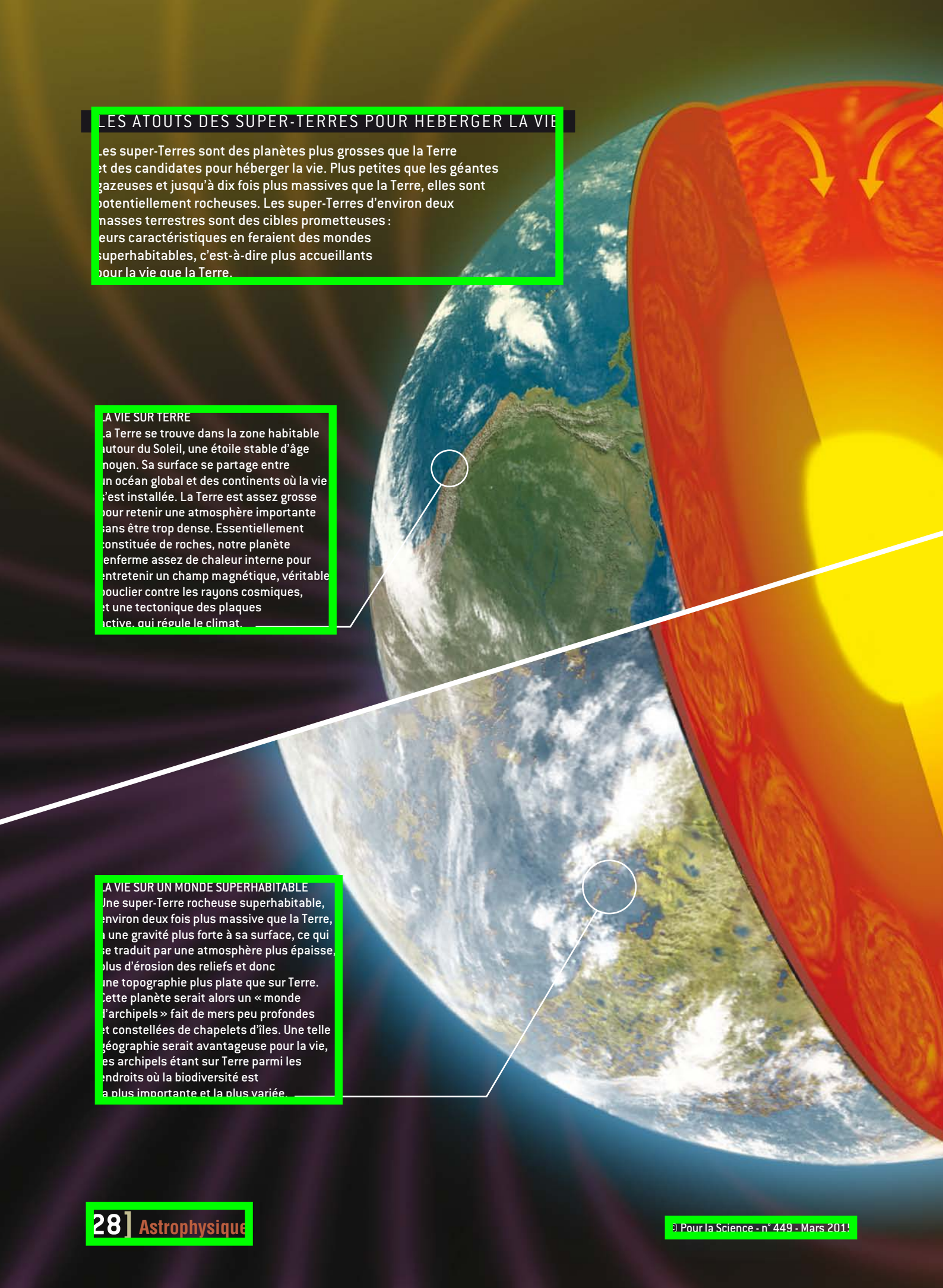
Si les biosphères extraterrestres modifient aussi leur environnement, peut-être leurs planètes deviennent-elles plus habitables en vieillissant ?

Des planètes superhabitables

se trouvent peut-être déjà dans notre catalogue d'exoplanètes.

LES ATOUTS DES SUPER-TERRES POUR HEBERGER LA VIE

Les super-Terres sont des planètes plus grosses que la Terre et des candidates pour héberger la vie. Plus petites que les géantes gazeuses et jusqu'à dix fois plus massives que la Terre, elles sont potentiellement rocheuses. Les super-Terres d'environ deux masses terrestres sont des cibles prometteuses : leurs caractéristiques en feraient des mondes superhabitables, c'est-à-dire plus accueillants pour la vie que la Terre.

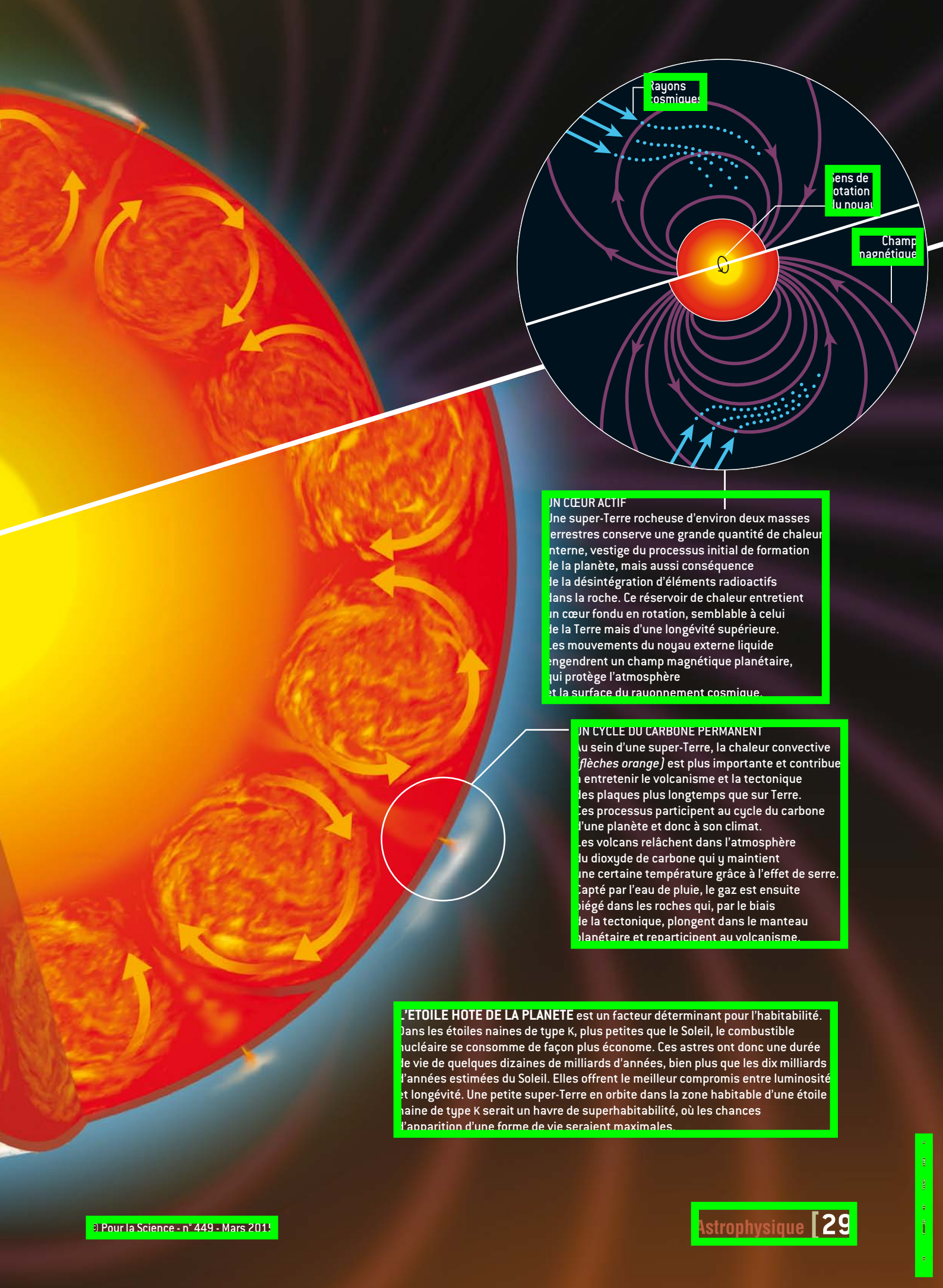


LA VIE SUR TERRE

La Terre se trouve dans la zone habitable autour du Soleil, une étoile stable d'âge moyen. Sa surface se partage entre un océan global et des continents où la vie s'est installée. La Terre est assez grosse pour retenir une atmosphère importante sans être trop dense. Essentiellement constituée de roches, notre planète renferme assez de chaleur interne pour entretenir un champ magnétique, véritable bouclier contre les rayons cosmiques, et une tectonique des plaques active, qui régule le climat.

LA VIE SUR UN MONDE SUPERHABITABLE

Une super-Terre rocheuse superhabitable, environ deux fois plus massive que la Terre, a une gravité plus forte à sa surface, ce qui se traduit par une atmosphère plus épaisse, plus d'érosion des reliefs et donc une topographie plus plate que sur Terre. Cette planète serait alors un « monde d'archipels » fait de mers peu profondes et constellées de chapelets d'îles. Une telle géographie serait avantageuse pour la vie, les archipels étant sur Terre parmi les endroits où la biodiversité est la plus importante et la plus variée.



UN CŒUR ACTIF
Une super-Terre rocheuse d'environ deux masses terrestres conserve une grande quantité de chaleur interne, vestige du processus initial de formation de la planète, mais aussi conséquence de la désintégration d'éléments radioactifs dans la roche. Ce réservoir de chaleur entretient un cœur fondu en rotation, semblable à celui de la Terre mais d'une longévité supérieure. Les mouvements du noyau externe liquide engendrent un champ magnétique planétaire, qui protège l'atmosphère et la surface du rayonnement cosmique.

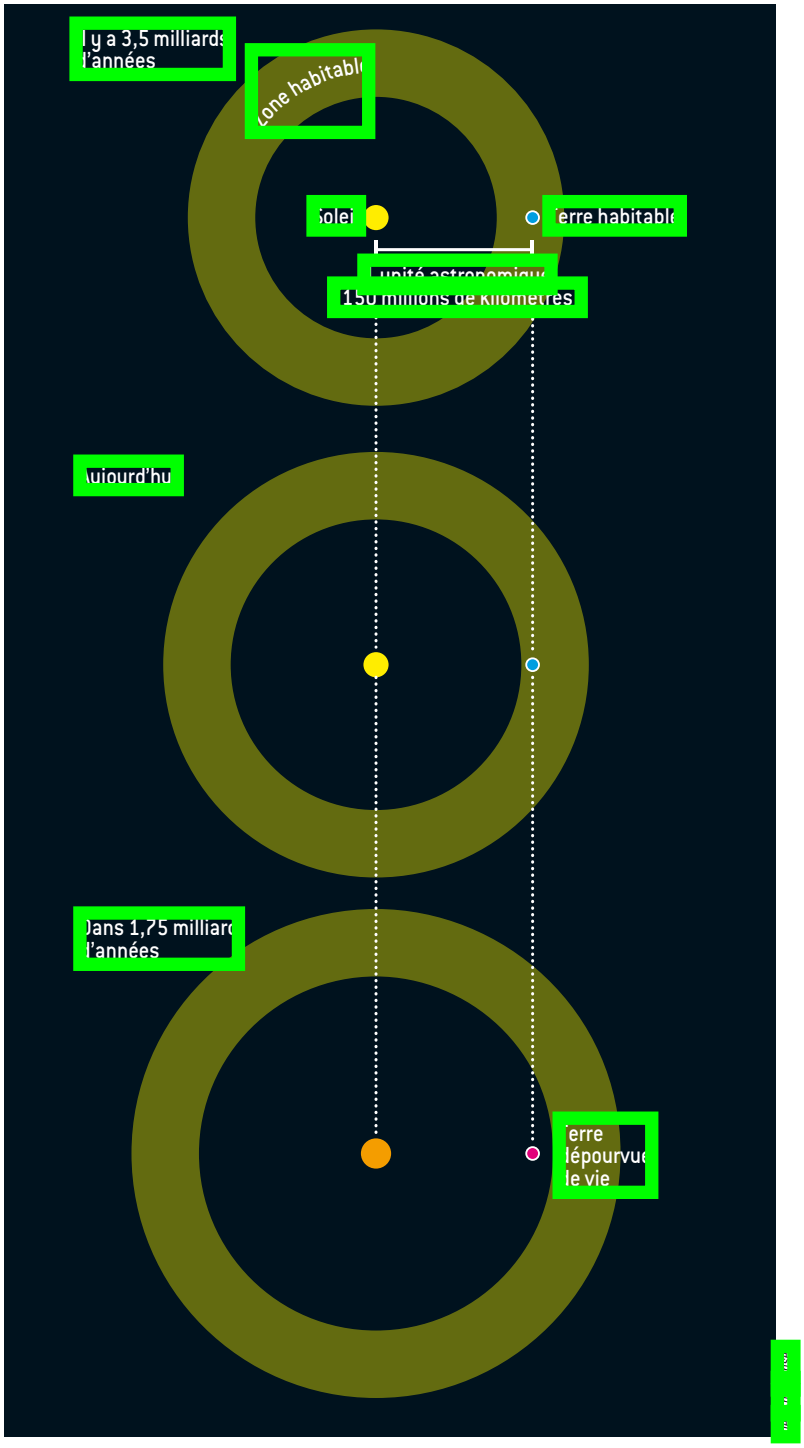
UN CYCLE DU CARBONE PERMANENT
Au sein d'une super-Terre, la chaleur convective *(flèches orange)* est plus importante et contribue à entretenir le volcanisme et la tectonique des plaques plus longtemps que sur Terre. Ces processus participent au cycle du carbone d'une planète et donc à son climat. Les volcans relâchent dans l'atmosphère du dioxyde de carbone qui y maintient une certaine température grâce à l'effet de serre. Capté par l'eau de pluie, le gaz est ensuite piégé dans les roches qui, par le biais de la tectonique, plongent dans le manteau planétaire et reparticipent au volcanisme.

L'ETOILE HOTE DE LA PLANETE est un facteur déterminant pour l'habitabilité. Dans les étoiles naines de type K, plus petites que le Soleil, le combustible nucléaire se consomme de façon plus économe. Ces astres ont donc une durée de vie de quelques dizaines de milliards d'années, bien plus que les dix milliards d'années estimées du Soleil. Elles offrent le meilleur compromis entre luminosité et longévité. Une petite super-Terre en orbite dans la zone habitable d'une étoile naine de type K serait un havre de superhabitabilité, où les chances d'apparition d'une forme de vie seraient maximales.

LA ZONE HABITABLE DU SOLEIL SE DEPLACE

À l'échelle humaine, la zone habitable autour du Soleil semble statique. Pourtant, en vieillissant, l'étoile chauffe de plus en plus et la zone habitable s'en éloigne. Les planètes habitables d'hier se retrouvent en dehors de ses limites. Aujourd'hui, la Terre se situe près du bord interne de la zone habitable du Soleil. Elle deviendra trop chaude pour abriter de l'eau liquide dans 1,75 milliard d'années.

Les étoiles naines de type K brillent moins intensément mais plus longtemps que le Soleil, et leur zone habitable se déplace peu durant des dizaines de milliards d'années, ce qui augmente les chances que la vie apparaisse sur leurs planètes.



L'étoile hôte et la zone habitable ne sont pas les seuls critères pour rendre superhabitable une planète. Cette dernière doit aussi être plus massive que la Terre. Cela préviendrait deux catastrophes susceptibles de s'abattre sur les planètes rocheuses qui prennent de l'âge. Lesquelles ?

Si la Terre était située dans la zone habitable d'une naine de type K, l'intérieur de la planète se serait refroidi bien avant la mort de l'étoile. Ce serait un obstacle à l'habitabilité. En effet, la chaleur interne d'une planète entretient les mouvements de convection dans le manteau, auxquels sont dues les éruptions volcaniques et la tectonique des plaques. Ces processus reconstituent et recyclent le contenu de l'atmosphère en gaz carbonique. Sans eux, la quantité de dioxyde de carbone atmosphérique diminuerait régulièrement. La pluie le ramènerait au sol où il se fixerait dans les roches. À terme, l'effet de serre global, dépendant du dioxyde de carbone, serait insuffisant pour maintenir la température atmosphérique. La planète se retrouverait probablement dans un état de « boule de neige » inhabitable, dans lequel toute l'eau de surface serait gelée.

Les effets pervers d'une masse inadaptée

Au-delà de la diminution de l'effet de serre, le refroidissement de l'intérieur d'une planète rocheuse vieillissante pourrait aussi faire disparaître le champ magnétique qui protège la planète des rayons cosmiques nocifs. Ce champ est engendré par la rotation de la partie liquide de son cœur de fer, que la convection et les turbulences transforment en dynamo. Le cœur reste liquide à cause de la chaleur résiduelle de la formation planétaire, ainsi que de la désintégration des isotopes radioactifs qui y sont naturellement présents.

Quand la chaleur interne d'une planète rocheuse s'est dissipée, le cœur se solidifie, l'effet dynamo prend fin et le bouclier magnétique disparaît. Le rayonnement cosmique et les éruptions stellaires érodent la haute atmosphère, et les particules cosmiques de haute énergie parviennent jusqu'à la surface. En conséquence, les planètes âgées perdraient une bonne partie de leur atmosphère – qui sert aussi de bouclier contre le rayonnement cosmique –, et les niveaux élevés de rayonnement qui s'ensuivraient seraient délétères.

Les super-Terres rocheuses vieillissent plus lentement que la Terre, car elles conservent plus longtemps leur chaleur interne grâce à leur masse supérieure.

Des planètes trois à cinq fois plus massives que la Terre sont peut-être trop grosses pour manifester une tectonique des plaques : la pression et la viscosité de leur manteau seraient si élevées qu'elles empêcheraient les mouvements de convection interne. En revanche, une planète rocheuse deux fois plus massive présenterait une tectonique des plaques assez active pour entretenir des cycles géologiques et un champ magnétique pendant plusieurs milliards d'années. Une telle planète aurait aussi un diamètre supérieur d'environ 25 % à celui de la Terre : ses éventuels organismes vivants disposeraient donc d'une surface habitable plus étendue d'environ 56 %.

À quoi ressemblerait une planète superhabitable ? La pesanteur y serait plus forte, et une super-Terre moyenne aurait donc probablement une atmosphère plus dense que la Terre. L'érosion des montagnes serait alors plus rapide. En d'autres termes, une telle planète aurait un air plus épais et un relief plus plat. Si elle comporte des océans, le paysage planétaire aplani signifierait que l'eau y forme de nombreuses mers peu profondes parsemées de chapelets d'îles, plutôt que des océans abyssaux avec quelques rares gros continents. La biodiversité dans les mers terrestres étant plus riche dans les eaux peu profondes qui bordent les côtes, un tel « monde d'archipels » serait très avantageux pour la vie. L'évolution, plus active dans des écosystèmes insulaires isolés, stimulerait la biodiversité.

Privé de vastes continents, un monde d'archipels n'aurait-il pas une habitabilité globale plus faible ? Pas nécessairement. On remarque en effet que les régions centrales d'un continent sont souvent des déserts stériles, car trop éloignées de l'air océanique, humide et tempéré.

Sur Terre, certaines régions sont trop chaudes et d'autres trop froides pour qu'une vie abondante s'y développe. Une plus grande homogénéité climatique dépend en particulier de la direction de l'axe de rotation propre de la planète par rapport au plan de l'orbite de révolution. L'axe de rotation de la Terre, par exemple, a une inclinaison d'environ 23,4 degrés, ce qui est à l'origine des saisons et réduit un peu les écarts de température entre les régions équatoriales chaudes et les régions polaires froides. La différence serait plus marquée si l'axe était perpendiculaire au plan orbital. Un monde d'archipels dont l'inclinaison de l'axe de rotation serait encore plus favorable que celle de la Terre pourrait avoir un équateur chaud sans être excessif, ainsi que des pôles relativement tempérés, sans glace. Et, grâce à la plus grande taille du globe et sa surface plus importante, les terres accueillantes pour la vie seraient plus nombreuses que s'il était composé de vastes continents.

Des mondes meilleurs… et plus nombreux

Réunies, toutes ces réflexions sur l'habitabilité suggèrent que les planètes superhabitables sont un peu plus grosses que la Terre et qu'elles ont des étoiles hôtes un peu plus petites et moins brillantes que le Soleil. Si ce raisonnement est correct, sa conclusion est passionnante pour les astronomes, parce qu'il est beaucoup plus facile de détecter des super-Terres en orbite autour d'étoiles naines que des jumeaux du système Terre-Soleil. Jusqu'à présent, les statistiques sur les populations d'exoplanètes suggèrent que les super-Terres autour de petites étoiles sont bien plus répandues dans la Voie lactée que les analogues du système Terre-Soleil. Il semblerait donc que les astronomes aient beaucoup plus d'endroits où rechercher la vie qu'ils ne le pensaient.

Ainsi, la planète Kepler-186f serait superhabitable. Elle a un diamètre supérieur de 11 % à celui de la Terre et elle est probablement rocheuse, en orbite dans la zone habitable d'une étoile naine de type M. Elle serait âgée de plusieurs milliards d'années. Malheureusement, nous ne pouvons l'observer avec assez de détails pour étudier son habitabilité, car elle est distante d'environ 500 années-lumière.

Des candidats superhabitables plus proches de nous seront peut-être bientôt découverts grâce à divers projets, en particulier la mission *Plato* de l'Agence spatiale européenne, qui devrait être lancée d'ici 2024. Ces planètes seront aussi des cibles de choix pour le télescope spatial *James Webb*, un observatoire dont le lancement est prévu pour 2018.

Avec un peu de chance, nous serons bientôt capables de pointer du doigt une région du ciel où se cache une planète qui, contrairement à ce que pensait Leibniz, serait plus accueillante que la Terre.

Quelques chiffres

200 milliards d'étoiles environ peuplent la Voie lactée, notre galaxie.

3 à 4 fois plus abondantes que les étoiles de type solaire, les naines de type K ont une longévité comprise entre 15 et 30 milliards d'années.

1 013 exoplanètes ont été découvertes par le télescope spatial *Kepler* jusqu'à présent.

4 175 candidates au titre d'exoplanète figurent encore dans les données de *Kepler*.

3 super-Terres de masse comprise entre une et deux fois celle de la Terre et situées dans la zone habitable de leur étoile sont connues.

Pourquoi vous avez faim... ou pas !

Gilles Mithieux

Pour réguler la sensation de faim, le cerveau sonde en permanence les réserves énergétiques et nutritionnelles de l'organisme. Les échanges nerveux avec le système digestif joueraient un rôle clef.

L'ESSENTIEL

- La sensation de faim, qui pousse à s'alimenter, permet de prévenir les carences énergétiques et nutritionnelles.
- Cependant, elle ne doit pas occuper l'esprit en permanence, sous peine de conduire à des excès.
- On a longtemps cru que pour réguler la faim, le cerveau ne se fondait que sur la tension de l'estomac et les informations véhiculées par la circulation sanguine.
- On découvre aujourd'hui que d'autres interactions directes avec l'appareil digestif, *via* les nerfs périphériques, jouent un rôle essentiel.

Midi approche. Vous sentez la faim vous envahir. Cette sensation remplit une fonction physiologique cruciale puisqu'elle vous pousse à vous alimenter quand vous manquez d'énergie et de nutriments. Elle vous permet ainsi de survivre. Comment est-elle déclenchée ? Et comment est-elle atténuée peu à peu au fil du repas, puis neutralisée pendant plusieurs heures ? La question est d'importance, à l'heure où l'obésité explose à l'échelle planétaire – au point que l'Organisation mondiale de la santé (OMS) parle d'épidémie. Chez de nombreuses personnes en surpoids, la sensation de faim serait déréglée.

On a longtemps pensé que, pour réguler cette sensation, le cerveau se fondait sur les informations hormonales véhiculées dans le sang, ainsi que sur des paramètres mécaniques tels que la tension de l'estomac. Cependant, les recherches récentes ont révélé des échanges complexes entre le cerveau et l'appareil digestif, *via* les nerfs périphériques.

L'AUTEUR

Gilles MITHIEUX est directeur de recherche au CNRS et dirige l'unité mixte Nutrition et cerveau (Inserm-Université Lyon 1), à Lyon.

BIBLIOGRAPHIE

G. Mithieux et A. Gautier-Stein, **Intestinal glucose metabolism revisited**, *Diabetes Res. Clin. Pract.*, vol. 105(3), pp. 295-301, 2014.

F. De Vadder *et al.*, **Microbiota-generated metabolites promote metabolic benefits *via* gut-brain neural circuits**, *Cell*, vol. 156, pp. 84-96, 2014.

J.-P. Warne et A.W. Xu, **Metabolic transceivers : In tune with the central melanocortin system**, *Trends Endocrinol. Metab.*, vol. 24, pp. 68-75, 2013.

G. Mithieux, **Nutrient control of hunger by extrinsic gastrointestinal neurons**, *Trends Endocrinol. Metab.*, vol. 24, pp. 328-384, 2013.

H.-R. Berthoud, **Anatomy and function of sensory hepatic nerves**, *Anat. Rec. A. Discov. Mol. Cell. Evol. Biol.*, vol. 280, pp. 827-835, 2004.

CETTE IMAGE VOUS DONNE FAIM ? Rien d'étonnant, car cette sensation est fortement influencée par le plaisir associé à l'acte alimentaire – ou à sa simple évocation – et par la préférence pour certains aliments (très variable selon les individus). Qui n'a jamais eu une faim soudaine en voyant un plat apprécié ou en respirant une odeur de cuisine ? On comprend mal ces phénomènes, sans lien apparent avec le maintien de l'équilibre énergétique ou nutritionnel du corps, mais on cherche à les éclaircir, car leur dérèglement pourrait être impliqué dans l'obésité.

Ces échanges joueraient un rôle prépondérant, en particulier dans la satiété.

On se cantonnera ici aux systèmes de régulation visant au maintien de l'équilibre énergétique et nutritionnel du corps. D'autres phénomènes influent sur la sensation de faim, mais ils sont encore mal compris *(voir la photographie ci-dessus)*.

Midi approche, donc. On sait depuis une vingtaine d'années que trois hormones et des signaux mécaniques régulent le déclenchement de la faim et sa diminution progressive quand on mange. À l'« arrière-plan » de votre esprit s'exercent les effets de la leptine, une hormone produite par le tissu adipeux – les cellules graisseuses – en proportion de sa masse. Véhiculée par le sang, la leptine atteint le cerveau, en particulier l'hypothamalus. Cette aire cérébrale profonde est irriguée par des capillaires sanguins dits fenestrés, dont la paroi est percée de pores qui laissent passer certaines grosses molécules.

De ce fait, l'hypothalamus est plus sensible aux hormones que les autres structures cérébrales, isolées de la circulation sanguine par la barrière hémato-encéphalique. Cette série de couches de cellules et de protéines disposée autour des vaisseaux isole le cerveau des substances toxiques et des micro-organismes pathogènes présents dans le sang.

Parvenue à l'hypothalamus, la leptine se lie à des récepteurs spécifiques situés à la surface de certains neurones. En réaction, la sensation de faim s'atténue *(voir l'encadré page ci-contre)*. Quand la masse du tissu adipeux diminue, par exemple lorsqu'une personne maigrit, la leptine se raréfie dans le sang ; la faim augmente alors. Précisons cependant que les personnes dotées d'une quantité significative de graisse n'ont pas moins faim, car une résistance à la leptine s'installe. C'est l'un des problèmes rencontrés dans l'obésité.

La leptine exerce donc un rôle de témoin de l'état des réserves énergétiques du corps et signale au cerveau la nécessité ou non de les reconstituer. Ses effets sur la faim s'exerceraient en permanence, sans périodicité liée au rythme des repas.

Une faim réglée comme une horloge

Le déclencheur de la faim qui vous saisit à l'approche du petit-déjeuner, du déjeuner ou du dîner, serait alors la ghréline, une hormone produite par l'estomac. Sécrétée juste avant l'heure habituelle des repas, elle passe dans le sang et va aussi se lier à des récepteurs sur les neurones de l'hypothalamus. L'effet est inversé par rapport à la leptine : la faim augmente.

Les mécanismes qui entraînent la sécrétion de ghréline avant le repas sont encore mal connus. Ils pourraient être liés à l'horloge circadienne, une horloge biologique interne

qui déclenche des modifications cycliques dans l'organisme en se calibrant notamment sur la rythmicité des repas journaliers.

Poussé par la faim, vous entamez alors le repas. Celui-ci ne doit pas se poursuivre indéfiniment, sous peine de dépasser les limites tolérables par l'organisme ! Qu'est-ce qui fait disparaître la sensation de faim ?

La peau du « ventre » bien tendue... signal clef du rassasiement !

Plusieurs signaux contribuent au rassasiement. Le plus important semble être la tension de l'estomac, mesurée par divers capteurs « mécanosensibles ». D'autres signaux sont de nature hormonale. Ainsi, la concentration de ghréline circulante se met à diminuer dès que l'on commence à manger. Simultanément, la concentration d'insuline, une hormone qui régule la glycémie (la concentration de glucose dans le sang), augmente. Cette hormone est sécrétée par le pancréas en réponse à l'élévation de la glycémie consécutive au repas. Elle fait rapidement diminuer cette dernière, en particulier en déclenchant l'utilisation de glucose dans les muscles squelettiques et le tissu adipeux. La glycémie retrouve sa valeur normale après que les nutriments ont fini d'être métabolisés.

L'insuline active les mêmes mécanismes moléculaires que la leptine dans l'hypothalamus et participe donc à la diminution de la faim consécutive au repas. Elle témoigne de la présence de nourriture en cours d'assimilation dans le système digestif et signale au cerveau l'inutilité de s'alimenter dans l'immédiat. Son rôle est complémentaire de celui de la leptine, qui est un signal à plus long terme.

Après la digestion, la tension de l'estomac ainsi que les concentrations de ghréline et d'insuline retrouvent des valeurs normales. Pourtant, il n'est pas encore temps de manger à nouveau, les réserves de nutriments et d'énergie étant reconstituées. Comment le cerveau prolonge-t-il l'état de non-faim, alors que les mécanismes du rassasiement n'agissent plus et que les nouvelles masses graisseuses n'ont pas encore eu le temps de produire de la leptine (une des hormones coupe-faim) ?

C'est ici qu'intervient la satiété, dont on a clarifié les mécanismes au cours des dernières années. On la distingue du

Comment la faim naît dans le cerveau

La sensation de faim est contrôlée par l'hypothalamus, une aire cérébrale profonde. Il y a plusieurs dizaines d'années, des expériences [illegible] de cette zone perturbe le comportement alimentaire.

Plus précisément, la faim serait régulée par le noyau paraventriculaire, une des quelque 40 sous-régions qui forment l'hypothalamus. Le noyau paraventriculaire est connecté à plusieurs aires cérébrales : le noyau arqué, une autre sous-région de l'hypothalamus qui détecte les signaux hormonaux arrivant *via* la circulation sanguine, et le tronc cérébral, qui centralise les informations nerveuses en provenance de la périphérie. La diversité des récepteurs et des neurones présents dans cette région fait qu'elle peut augmenter ou atténuer la faim, selon les signaux qu'elle reçoit.

Plusieurs hormones, en particulier la leptine, l'insuline et la ghréline, influent sur l'activité du noyau arqué.

Les deux premières coupent progressivement la faim : quand elles se fixent sur les neurones du noyau arqué, ceux-ci libèrent dans le noyau paraventriculaire des hormones dites mélanotropes, qui font disparaître la sensation de faim ; en outre, elles inhibent une autre population de neurones, qui empêchent les hormones mélanotropes d'agir.

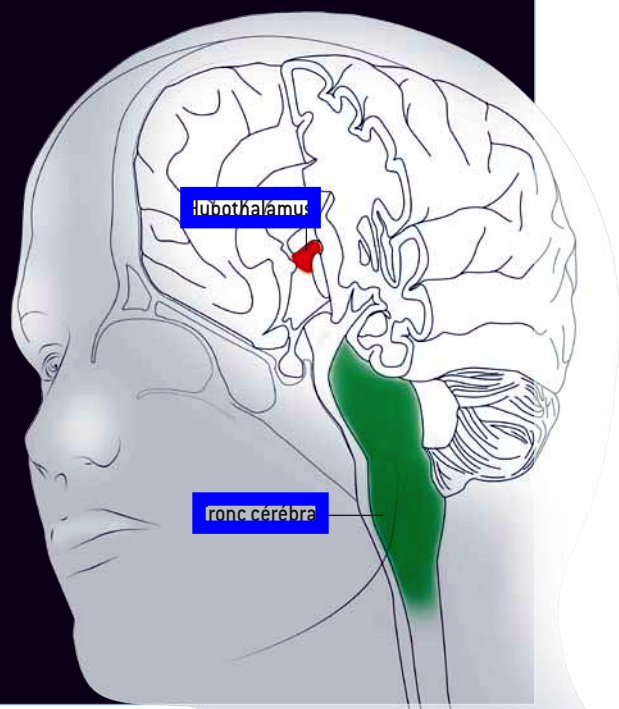
La ghréline a l'effet inverse : elle inhibe la libération des hormones mélanotropes et active les neurones qui empêchent ces dernières d'agir ; elle déclenche donc la faim.

De multiples autres hormones (telle la cholécystokinine, sécrétée par l'intestin) et neuromédiateurs (des substances assurant la communication entre neurones) peuvent aussi influencer la faim. Leurs rôles exacts et leurs mécanismes restent à préciser.

La concentration sanguine de ces substances varie en fonction de l'état des réserves énergétiques du corps et de l'éloignement du repas, d'où un effet variable sur la faim. La régulation hormonale est ainsi l'un des deux piliers de cette sensation.

Le second réside dans les interactions nerveuses. Des capteurs « mécanosensibles » mesurent la tension de l'estomac, dont l'évolution conduit le cerveau à couper peu à peu la faim à mesure de l'ingestion des aliments. La satiété, qui survient plusieurs heures après le repas, est quant à elle déclenchée lorsque le système nerveux détecte du glucose dans la veine porte, à la sortie de l'intestin. Les signaux résultants arrivent au tronc cérébral.

Ce dernier est connecté au noyau paraventriculaire, dont il pourrait moduler l'activité, ce qui déclencherait l'effet coupe-faim. Le tronc cérébral pourrait aussi produire directement cet effet. Ainsi, depuis les années 1990, de nombreuses études ont montré qu'il est capable de contrôler en partie la faim en l'absence d'hypothalamus. Il a d'ailleurs également des neurones qui synthétisent des hormones mélanotropes et d'autres qui sont dotés des récepteurs associés. En outre, les hormones véhiculées dans le sang y accèdent assez facilement, de même que dans l'hypothalamus.



rassasiement, une diminution de la sensation de faim intervenant en cours de repas, qui incite à le terminer et qui dure jusqu'à la fin de la digestion, soit quatre à cinq heures après le repas chez l'homme. On a alors la sensation d'avoir l'estomac plein. La satiété, quant à elle, est une sensation de non-faim qui persiste plusieurs heures après l'assimilation des nutriments.

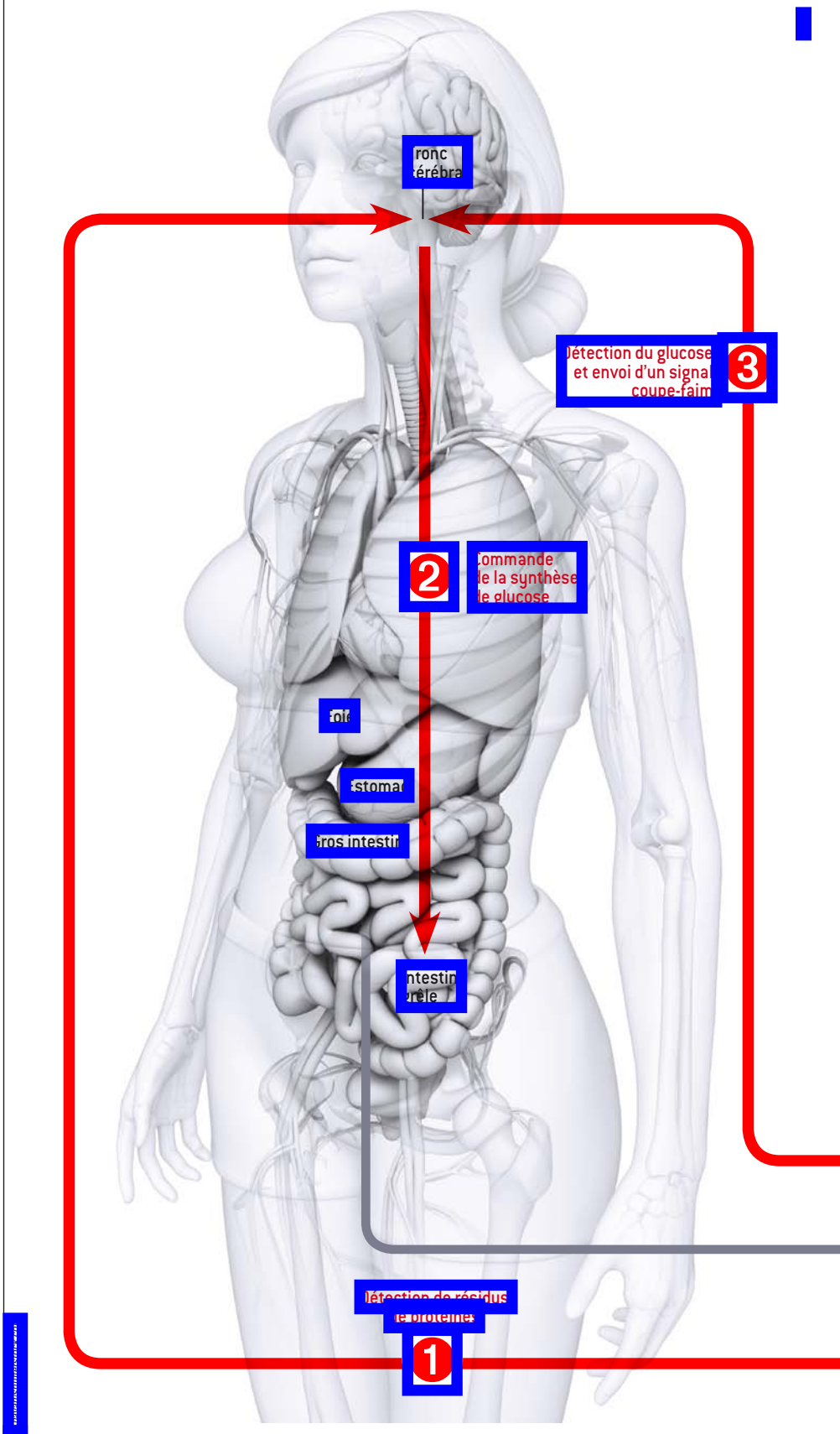
On sait depuis les années 1980 que la détection de glucose à la sortie de l'appareil digestif entraîne un signal coupe-faim. Cette détection s'opère dans la veine porte, qui réunit les veines irriguant l'intestin et déverse son contenu dans le foie. Cette veine est en position idéale pour détecter les informations nutritionnelles issues des repas : c'est le seul organe exposé directement à l'ensemble des signaux résultant de l'alimentation, avant la métabolisation par le foie. Un réseau dense d'astrocytes (les cellules nourricières des neurones) et de terminaisons neuronales traverse ses parois. Les terminaisons présentent à leur surface plusieurs récepteurs activés par divers produits de la digestion.

La détection de glucose par ces terminaisons entraîne l'émission d'un signal nerveux, qualifié de signal glucose portal, et transmis au cerveau par les nerfs vagues (qui arrivent directement au tronc cérébral) et splanchniques (qui passent par la moelle épinière). Les recherches récentes ont montré que ce signal est à l'origine de la satiété, grâce à une synthèse secondaire de glucose à partir d'autres nutriments plusieurs heures après le repas.

Pourquoi le glucose directement issu de la digestion ne coupe-t-il pas la faim bien plus tôt ? Un fort débit de ce dernier se déverse pourtant dans la veine porte, en moyenne 30 minutes après l'ingestion du premier aliment (cette durée est très variable selon le type de repas). Il représente jusqu'à deux fois la quantité totale de glucose endogène produite par le corps pour réguler la glycémie en dehors des repas ou pendant la nuit.

Cependant, en 2007, John-Paul Baird, du *Amherst College*, aux États-Unis, et ses collègues ont montré que lorsque le glucose parvenait dans l'appareil digestif pendant le repas, cela n'accélérait pas la fin de ce dernier, mais diminuait la taille du suivant. On pense donc que lors d'un repas, les autres signaux coupe-faim, tels que la tension de l'estomac, masquent le signal nerveux issu de la détection du glucose. Ce n'est plus le

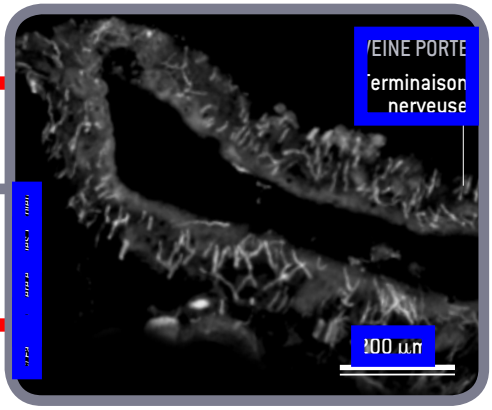
POURQUOI VOUS TENEZ JUSQU'AU DINER : LES ROUAGES



Quatre ou cinq heures après le déjeuner ou un autre repas conséquent, la digestion est presque [illegible] ri ! – pas encore là. À la place règne une sensation de satiété, déclenchée par certains types d'aliments.

Les protéines sont les seules pour lesquelles le mécanisme est établi de façon certaine. Après l'ingestion, elles sont décomposées dans l'appareil digestif. Les produits résultants passent dans la veine porte, à la sortie de l'intestin (cette veine est « enfouie » sous ce dernier sur l'illustration ci-contre). Là, ils activent les terminaisons nerveuses qui traversent la paroi *(en blanc sur l'image ci-dessous)*. Ces terminaisons sont celles des nerfs vagues et splanchniques, qui desservent presque tous les organes de la cavité abdominale : le foie, l'estomac, les intestins, les reins.... Ils se connectent au tronc cérébral, directement pour les nerfs vagues et en passant par la moelle épinière pour les nerfs splanchniques. Ils forment des voies nerveuses à double sens, transmettant des informations du cerveau vers la périphérie, telles que des commandes musculaires ou des signaux influant sur la production de glucose, et dans l'autre sens, des influx sensitifs.

La détection des résidus de protéines dans la veine porte entraîne l'envoi d'un signal nerveux au cerveau, plus précisément au tronc cérébral (1). En réaction, le cerveau déclenche la néoglucogenèse dans l'intestin – la production de glucose à partir des résidus de protéines (2). Le glucose produit est détecté dans la veine porte, ce qui provoque l'envoi d'un nouveau message nerveux au tronc cérébral (3). Qualifié de signal glucose portal, ce signal entraîne la satiété.



cas plusieurs heures après, et ce signal peut alors exercer une influence significative.

L'arrivée tardive de glucose dans la veine porte peut avoir plusieurs causes. L'amidon, les protéines et les fibres en seraient à l'origine. Ainsi, une hypothèse suggère que la digestion de l'amidon fournit du glucose plusieurs heures après le repas ; elle serait lente, car cette molécule est résistante et ne se laisse pas décomposer facilement.

Si cette hypothèse reste à confirmer, les choses se précisent pour les protéines et les fibres. En 2012, nous avons reconstitué pour la première fois les mécanismes de la satiété dans le cas des protéines *(voir l'encadré ci-contre)*. Après l'ingestion de ces dernières, les peptides issus des premières étapes de la digestion sont détectés par des récepteurs particuliers (les récepteurs μ-opioïdes) des terminaisons neuronales tapissant les parois de la veine porte. Un signal est alors transmis au cerveau, là encore *via* les nerfs vagues et splanchniques. En retour, le cerveau lance une synthèse tardive de glucose dans l'intestin, à partir de substrats issus de divers autres composés alimentaires digérés, tels que des fragments de protéines. Cette néoglucogenèse est par ailleurs essentielle pour réguler la glycémie lorsqu'on n'ingère pas de glucose.

Le message nerveux entraîne, dans les cellules de la muqueuse intestinale, l'expression de gènes codant des enzymes qui transforment les fragments de protéines en glucose. Du glucose est ainsi produit dans l'intestin, quatre à cinq heures après le repas. Il passe ensuite dans la veine porte, ce qui entraîne l'émission du signal glucose portal et déclenche la satiété.

Les effets des fibres contre le diabète et l'obésité enfin expliqués

En 2014, nous avons montré que les fibres alimentaires, présentes essentiellement dans les fruits et certains légumes, activent aussi la néoglucogenèse et le signal glucose portal. Les enzymes des mammifères sont impuissantes à les digérer, mais les bactéries intestinales peuvent en décomposer certaines en acides gras à courte chaîne (acétate, propionate et butyrate). Une partie de ces derniers active les terminaisons nerveuses de la veine porte, *via* le récepteur des acides gras FFAR3. De même que pour les protéines, un signal est transmis au cerveau, qui déclenche la

Maigrir avec des protéines ?

Les protéines coupent la faim quatre à cinq heures après le repas. Est-ce à dire que les régimes hyperprotéinés sont efficaces ? Non, car si les protéines aident à supporter une perte de poids rapide, celle-ci enclenche une réaction de défense de l'organisme, qui favorise le stockage de l'énergie – en d'autres termes, la production de graisse. La fin du régime entraîne alors un effet yoyo ! Pour perdre du poids durablement, il faut privilégier une stratégie très progressive, en mangeant un peu moins et des aliments peu énergétiques...

néoglucogenèse. Les briques de construction du glucose ne sont pas ici des fragments de protéines, mais d'autres composés, tels que le propionate (l'un des acides gras issus de la fermentation des fibres, qui joue donc le double rôle de messager et de matériau). Notons que le butyrate, un autre produit de la fermentation des fibres, entraîne aussi directement l'expression des gènes codant les enzymes de la néoglucogenèse.

Les fibres empêchent-elles également d'avoir un petit creux quelques heures après le repas ? Le sujet est controversé. Certains chercheurs ont constaté un effet coupe-faim important, mais nos résultats suggèrent que dans le cas des fibres, il reste léger et que le principal effet du signal glucose portal est d'augmenter la dépense énergétique de repos (en dehors de tout exercice physique) : à ce signal, l'organisme, bien qu'au repos, brûlerait plus d'énergie. On observe en tout cas une accumulation moins importante de tissus graisseux, et donc un effet anti-obésité. Cet effet se retrouve aussi, dans une moindre mesure, avec les protéines.

Les bactéries intestinales donnent-elles faim ?

En 2014, l'équipe de Sergueï Fetissov, de l'Inserm, a montré que certaines bactéries intestinales influent sur la sensation de faim. Elles déclenchent la libération par le système immunitaire d'anticorps qui interagissent avec l'hypothalamus, une aire cérébrale régulant la faim. Cependant, cette influence doit être confirmée et ses mécanismes explicités. En effet, les biologistes ont montré qu'elle provoque tantôt l'anorexie et tantôt la boulimie, ce qui semble difficile à expliquer.

Ces deux types d'aliments entraînent également une meilleure régulation de la glycémie et protègent donc contre le diabète. En effet, certains types de diabète se caractérisent par une augmentation de la glycémie, que l'insuline est impuissante à réguler. Quand on incorpore des protéines ou des fibres alimentaires dans des aliments gras et sucrés donnés à des animaux diabétiques, l'efficacité de l'insuline est rétablie, mais seulement lorsque la néoglucogenèse fonctionne. C'est donc bien elle, à travers le signal glucose portal, qui en serait responsable. Pour les fibres, les effets anti-obésité et anti-diabète étaient connus depuis plus de 30 ans, mais sans qu'on en comprenne les mécanismes.

Le cerveau et le système digestif interagissent donc en permanence, par les voies sanguines et nerveuses. Quatre à cinq heures après le déjeuner, vous ressentez alors une sensation de satiété, plus ou moins intense en fonction de la richesse du repas en amidon, en protéines ou en fibres. Cette sensation devrait durer quelques heures… De quoi tenir jusqu'au dîner !

Actuellement en kiosque

L'ESSENTIEL Cerveau & Psycho

L'ESSENTIEL Cerveau & Psycho

D'où vient le mental des champions ?

La performance éclairée par les neurosciences

EXCLUSIF !

Entretien avec Luc Abalo

Le joueur du PSG-Handball se confie à notre expert en psychologie

L'ESSENTIEL
FÉVRIER - AVRIL 2015

M 03690 - 21 - F: 7,50 € - RD

France métro. : 7,50 €, Bel. : 9,20 €, Lux. : 9,20 €, Maroc: 95 MAD, Port. Cont. : 9,60 €, Suisse : 15,50 FS, Canada: 12,90 $ CAN., TOM : 1260 XPF, DOM : 8,90 €

n°21 – 96 pages – prix de vente : 6,95 €

Feuilletez les premières pages sur
www.cerveauetpsycho.fr

Disponible sur
Disponible sur App Store
DISPONIBLE SUR Google play

Compter les excursions sur un échiquier

Alin Bostan et Kilian Rasche

Le dénombrement des chemins allant d'un point à un autre d'un réseau est un problème mathématique difficile. Illustration avec le cas des marches dites de Gessel, récemment résolu.

Imaginons un échiquier s'étendant à l'infini dans les directions Est et Nord. Supposons que le roi, un « roi biaisé », puisse se déplacer d'une case vers l'Est, l'Ouest, le Sud-Ouest ou le Nord-Est *(voir la figure page 43)*. Si ce roi part du coin inférieur gauche de l'échiquier, combien existe-t-il de chemins possibles qui le font revenir à son point de départ en n coups, n étant un entier positif fixé ? En 2001, Ira Gessel, mathématicien de l'Université Brandeis aux États-Unis, conjectura une formule donnant ce nombre de possibilités en fonction de n.

Depuis l'énoncé de cette conjecture jusqu'à sa première preuve en 2008, qui utilisait de façon cruciale la puissance des ordinateurs, puis sa première démonstration purement humaine en 2013, beaucoup de mathématiciens se sont confrontés à ce problème par des approches très différentes.

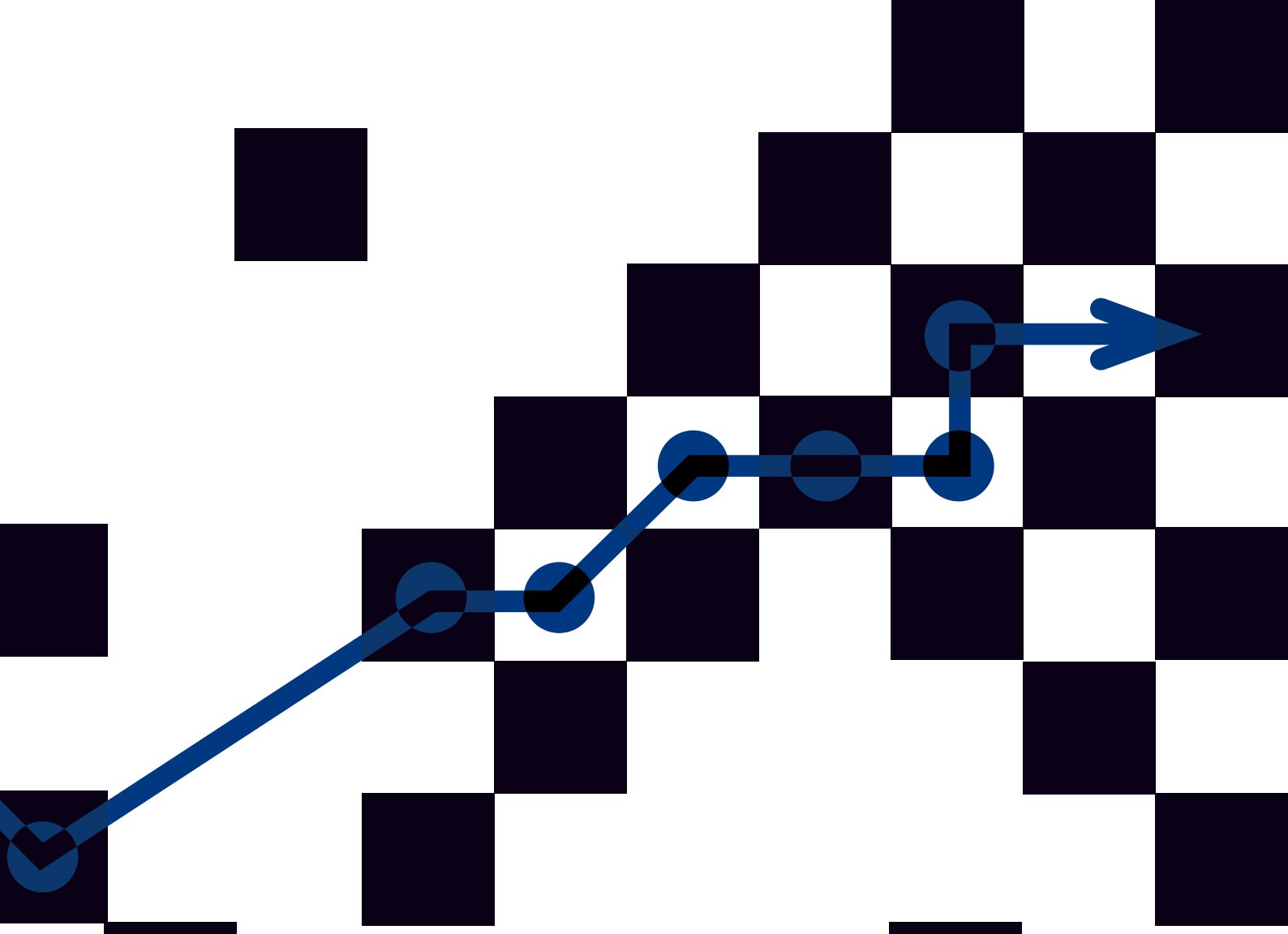
Mais tout d'abord, pourquoi compter des chemins ? Depuis quand le faisons-nous ? Un exemple historique est le problème de la partie interrompue *(voir l'encadré page 42)*, posé au XVII^{e} siècle par le Chevalier de Méré à Blaise Pascal, et dont la solution proposée par ce dernier consiste à compter différents chemins dans un « arbre de probabilités », dirait-on aujourd'hui en classe de terminale S).

Si c'est son application aux jeux de hasard qui intéressait le Chevalier de Méré, ce problème a une portée plus générale. Il était déjà apparu en Italie au XIV^{e} siècle, pour modéliser la rupture de contrats entre marchands associés dans une entreprise risquée.

Plus récemment, au XIX^{e} siècle, le dénombrement des chemins a permis de résoudre le « problème du scrutin » : lors du dépouillement (dans un ordre aléatoire) d'une élection avec deux candidats A et B, où A gagne avec un nombre de a votes sur un total de $(a + b)$ votes, quelle est la probabilité que A reste en tête tout au long du dépouillement ? On peut prouver par différentes méthodes que cette probabilité vaut $(a–b)/(a+b)$; or les deux démonstrations les

L'ESSENTIEL

- Dénombrer des chemins sur un réseau périodique est un problème qui apparaît dans des domaines scientifiques variés.
- Les situations où l'on a pu trouver une formule exacte sont rares.
- Pour un type de marches, une formule a été conjecturée par le mathématicien Ira Gessel en 2001.
- Cette conjecture a été prouvée à l'aide de calculs par ordinateur en 2008, puis sans cette aide en 2013.



plus populaires utilisent des chemins.

Malgré ces exemples, le comptage des marches est longtemps resté l'apanage des mathématiques récréatives. Il a fallu attendre les années 1960 pour qu'il devienne une discipline à part entière, au carrefour des mathématiques, pures ou appliquées, parce qu'il utilise des méthodes variées : algébriques, combinatoires, analytiques, probabilistes, etc. Soulignons aussi que le dénombrement de chemins intervient dans de nombreux modèles (magnétisme, physique des polymères, etc.) étudiés en physique statistique.

Le cas particulier du comptage des chemins dans le plan est doublement important : d'abord pour lui-même, et aussi parce qu'il constitue un modèle-jouet, c'est-à-dire un exemple dont la complexité paraît maîtrisable, et qui aide à tester de nouvelles idées avant de traiter un cas plus général, en trois dimensions par exemple.

Le problème est le suivant. On considère le plan comme un réseau périodique de points, on se fixe un ensemble de sauts possibles (les pas que la marche pourra suivre) et éventuellement de contraintes (par exemple, la marche ne doit pas toucher une certaine ligne) ; il s'agit alors de compter les chemins partant d'un point (disons l'origine du plan) et arrivant, après un nombre donné n de pas, en tel point ou dans tel domaine.

Dans la suite, on s'intéressera surtout au nombre e_n d'excursions de longueur n, c'est-à-dire de chemins formés de n pas partant de l'origine et y revenant. Pour les chemins non contraints, ce problème est facile et sa solution est connue depuis longtemps. Quant aux chemins contraints, différents cas ont été explorés : ne pas toucher une ligne, rester dans un demi-plan, dans un quart de plan, dans une région du plan avec des contours plus compliqués, etc. En fait, il existe une infinité d'exemples possibles. Dans la plupart des cas, le problème est hors de portée ; c'est pourquoi on se restreint souvent à la classe particulière des marches à petits sauts – composées

En géométrie, il n'y a pas de chemin réservé aux rois.

Euclide

Le problème de la partie interrompue

Deux joueurs jouent à pile ou face, le gagnant étant celui qui remporte trois parties ; chacun a misé au départ la même somme d'argent *m*. Supposons que le jeu s'arrête alors que l'un des deux joueurs ait remporté trois victoires et, de ce fait, la totalité des mises, soit 2*m*.

Comment, dans ces circonstances, doit-on partager cette somme ?

La solution proposée par Pascal consiste à compter les chemins, au sens d'énumérer les différentes possibilités.

Supposons que le jeu s'arrête alors qu'un des joueurs a gagné deux parties et l'autre une seule partie (situation notée 2/1). Si le jeu avait continué, il y aurait eu deux possibilités : la situation 2/2, pour laquelle il aurait été équitable de partager équitablement la mise (chacun *m*), et la situation 3/1, pour laquelle le premier joueur aurait tout remporté (2*m*). En faisant la moyenne (chaque événement étant équiprobable) on trouve qu'il est légitime que le premier joueur gagne 3*m*/2 et le deuxième *m*/2.

On procède de façon analogue si la situation initiale est différente de 2/1.

uniquement de déplacements aux plus proches voisins – dans des domaines angulaires simples.

L'un des premiers exemples est la marche dite de Kreweras, où les déplacements se font dans un quadrant (un quart de plan) et uniquement dans les directions Ouest, Sud et Nord-Est *(voir la figure page 45)*. Cette marche tire son nom du mathématicien français Germain Kreweras (1918-1998) qui, en 1965, parvint (en une preuve longue de plusieurs dizaines de pages !) à compter les excursions : il prouva que $e_{3n} = 4^n/[(n+1)(2n+1)]\,C_{3n}^n$, où les $C_p^k = p!/[k!\,(p-k)!]$ sont les coefficients du binôme, c'est-à-dire les coefficients de $x^k y^{p-k}$ dans le développement de $(x+y)^p$.

Une formule qui compte

Un autre cas particulier populaire est la marche dite simple, où les directions des pas sont les quatre points cardinaux : en 1921, le Hongrois George Pólya montra que, sur un échiquier infini dans toutes les directions, la probabilité qu'un roi exécutant une marche simple retourne à la case départ au bout d'un nombre fini de pas est égale à 1. Il existe aussi des formules pour le nombre d'excursions restreintes à un demi-plan ou à un quart de plan *(voir la figure page 46)*. Et en 1986, Dominique Gouyou-Beauchamps, informaticien à l'Université Paris-Sud, obtint une formule pour le domaine angulaire d'ouverture 45°, domaine qui se ramène au quart de plan par une transformation simple.

C'est dans ce contexte que Ira Gessel énonça sa conjecture. Selon celle-ci, le nombre de possibilités pour que le roi biaisé parte du coin inférieur gauche de l'échiquier et y revienne après $2n$ étapes (il ne peut revenir à l'origine en un nombre impair de pas) est égal à $e_{2n} = 4^n A_n B_n$, où $A_n = (2-5/5)(2-5/8)(2-5/11)\cdots[2-5/(3n+2)]$ et $B_n = (2-3/2)(2-3/3)(2-3/4)\cdots[2-3/(n+1)]$. (Le fait même que le produit $4^n A_n B_n$ soit un nombre entier n'est pas une évidence !)

Par exemple, pour $n = 1$, ce nombre vaut $e_2 = 4^1(2-5/5)(2-3/2) = 2$. Pour $n = 2$, on obtient : $e_4 = 4^2(2-5/5)(2-5/8)(2-3/2)(2-3/3) = 11$. Et pour $n = 3$, la même formule donne $e_6 = 85$. On peut retrouver ces résultats relatifs aux petites valeurs de n en énumérant de façon exhaustive, sur un dessin, les chemins. Notons par ailleurs qu'on peut voir la marche de Gessel comme la marche simple dans un domaine d'angle égal à 135 degrés *(voir la figure page 46)* ; c'est ainsi que Ira Gessel parvint à sa conjecture.

Jusqu'ici, nous nous sommes intéressés à la question de trouver des formules qui comptent certains chemins dans le plan. Une telle formule n'existant pas toujours, on peut alors poser une autre question, d'ordre plus qualitatif. Les nombres d'excursions e_n satisfont-ils une relation de récurrence *(voir l'encadré page 43)* ? Une telle relation entre des nombres permet souvent de mieux les connaître et les calculer, ou d'en trouver des approximations utiles.

Kreweras a montré que les excursions de la marche éponyme satisfont à une équation de récurrence linéaire ; d'autres marches présentent aussi cette propriété. Mais ce n'est pas toujours le cas, comme l'ont montré en 2003 Mireille Bousquet-Mélou, de l'Université de Bordeaux, et Marko Petkovšek, de l'Université de Lubiana en Slovénie, sur l'exemple du déplacement d'un cavalier aux échecs sur un échiquier s'étendant à l'infini dans les directions Est et Nord. À l'époque où Ira Gessel a énoncé sa conjecture, la plupart des spécialistes de combinatoire pensaient que les nombres d'excursions de Gessel ne vérifient pas de relation de récurrence linéaire.

En avril 2001, Ira Gessel partagea sa conjecture pour la première fois, en l'envoyant par courriel à Mireille Bousquet-Mélou. Cette dernière s'intéressait à l'époque aux marches dans un quart de plan, en lien avec la question de l'existence de relations de récurrence. Un peu plus

LES AUTEURS

Alin BOSTAN est chercheur à l'Inria, à Saclay près de Paris. Kilian RASCHEL est chercheur au CNRS et travaille au Laboratoire de mathématiques et physique théorique à l'Université de Tours.

ard, en 2002, elle posa les fondements d'une approche permettant de compter les marches dans un quart de plan au moyen de « fonctions génératrices » – fonctions qui, lorsqu'on les exprime sous forme de séries, codent les informations recherchées dans les coefficients de ces séries *(voir l'encadré page 44)*. Ainsi, la fonction génératrice des excursions a pour développement une série dont les coefficients correspondent aux nombres d'excursions e_n pour toutes les valeurs de n.

Équation fonctionnelle

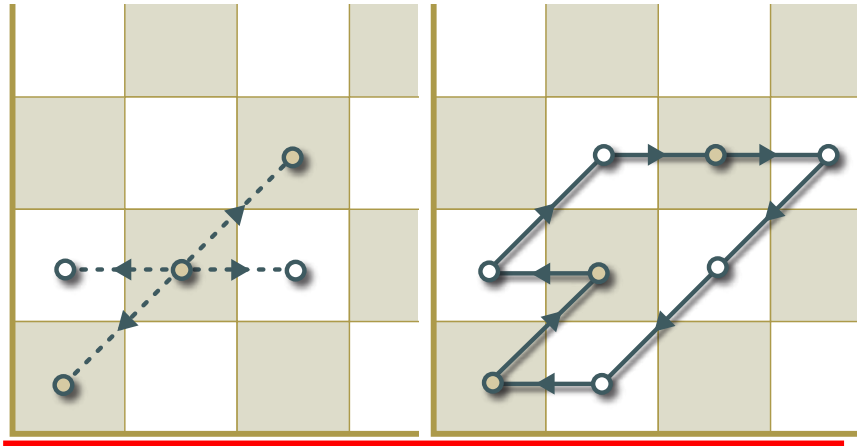
L'approche de Mireille Bousquet-Mélou est fondée sur une équation, dite fonctionnelle, assez simple satisfaite par la fonction génératrice et qui traduit la décomposition naturelle de toute marche de longueur $(n+1)$ en une marche de longueur n à laquelle s'ajoute un dernier pas. Le cœur du travail consistait notamment à déterminer la fonction génératrice à partir de l'équation fonctionnelle qu'elle doit satisfaire. Cette approche s'est révélée la bonne : toutes les autres utilisent comme point de départ les fonctions génératrices et l'équation fonctionnelle.

Mireille Bousquet-Mélou et Marni Mishna, de l'Université Simon Fraser au Canada, ont alors entrepris une étude systématique des marches à petits sauts dans un quadrant. Il existe *a priori* $2^8 = 256$ modèles, car on peut choisir d'inclure ou non chacun des huit plus proches voisins comme pas intervenant dans la marche (soit deux choix possibles par proche voisin). Les deux chercheuses ont d'abord montré qu'en fait, seuls 79 des 256 modèles sont intrinsèques au quart de plan et sont fondamentalement différents. En effet, certains des $256 - 79 = 177$ modèles restants sont triviaux (tel celui de la marche immobile), d'autres sont symétriques entre eux et, enfin, certains sont équivalents à des modèles de marches évoluant dans un demi-plan, bien compris depuis des travaux antérieurs.

Les études de Mireille Bousquet-Mélou et Marni Mishna se sont ainsi conclues par un article fondateur de la combinatoire des marches dans un quart de plan, qui résout 22 des 79 cas irréductibles. Pourquoi 22 ? Parmi les 79 cas, 23 (dont la marche simple, celles de Kreweras, de Gouyou-Beauchamps, de Gessel) sont particuliers au sens où un certain groupe, structure algébrique qui traduit généralement une certaine symétrie du modèle, est fini (c'est-à-dire constitué d'un nombre fini d'éléments). L'unique cas non résolu et associé à un groupe fini était précisément celui de la marche de Gessel !

La marche de Gessel était le dernier cas non résolu d'une famille de 23 marches associées à un groupe fini.

L'histoire de la résolution de la conjecture de Gessel débute le 28 janvier 2008, lors d'un séminaire organisé par l'équipe *Algorithms* de l'Inria à Rocquencourt, et auquel participaient Marni Mishna et Manuel Kauers, postdoctorant à l'époque. Ce dernier y mentionna des avancées récentes, obtenues en collaboration avec Doron Zeilberger, de l'Université Rutgers aux États-Unis, sur une approche par ordinateur consistant à deviner et prouver automatiquement des équations de récurrence.



POUR LES MARCHES DE GESSEL, les déplacements élémentaires autorisés sont d'une case vers l'Est, l'Ouest, le Nord-Est ou le Sud-Ouest *(à gauche)*. La conjecture de Gessel portait sur le nombre e_n d'excursions en fonction du nombre n de pas *(à droite, une excursion de huit pas)*.

Les suites récurrentes

Une suite définie par récurrence est une suite donnée par son premier terme (ou quelques-uns de ses premiers termes) et une relation permettant de calculer chaque terme à partir du précédent (ou des quelques précédents).

L'ordre de la suite récurrente est le nombre de termes précédents dont on a besoin. Par exemple, la suite (u_n) définie par $u_n = 16^n$ est récurrente d'ordre 1, avec $u_0 = 1$ et $u_{n+1} = 16\,u_n$. Un exemple légèrement plus complexe est la suite (v_n) définie par $v_0 = 1$ et $v_{n+1} = (n+1)v_n$ (d'ordre 1 également). La solution est ici la factorielle, notée $n!$, qui est le produit de tous les entiers allant de 1 à n. Un dernier exemple célèbre est la suite de Fibonacci (w_n), définie par $w_0 = 0$, $w_1 = 1$ et $w_{n+2} = w_{n+1} + w_n$ (récurrence d'ordre 2). Rappelons que cette suite est reliée au nombre d'or $\phi = (1 + \sqrt{5})/2$, car on peut montrer que $w_n = (\phi^n - (-1/\phi)^n)/\sqrt{5}$. Les suites récurrentes vérifiées par les nombres de marches évoquées dans cet article peuvent être d'ordre bien supérieur à 1 ou 2.

Un site web impressionnant, contenant des centaines de milliers de suites apparaissant en combinatoire, est l'encyclopédie en ligne de Neil Sloane (www.oeis.org).

Séries et fonctions génératrices

Une série génératrice est une « somme infinie » (plus rigoureusement, une *série formelle*) $S = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \cdots$ dont les coefficients a_n sont les termes d'une suite que l'on cherche à étudier ; on dit que la série S est associée à la suite (a_n), ou que S est sa série génératrice.

Ces séries furent introduites par le mathématicien français Abraham de Moivre en 1730, afin d'obtenir des formules explicites pour des suites définies par récurrence.

Il est souvent possible d'étudier une suite donnée à l'aide de manipulations formelles de la série génératrice S associée, ainsi qu'en utilisant les propriétés de la fonction $f(x)$ qui représente la somme de la série S.

À titre d'exemple, précisons la fonction génératrice de chacune des trois suites mentionnées dans l'encadré portant sur les suites récurrentes *(voir page 43)*, à savoir les suites de terme général égal respectivement à $u_n = 16^n$, $v_n = n!$ et $w_n = (\phi^n - (-1/\phi)^n)/\sqrt{5}$ (suite de Fibonacci).

Pour la suite (u_n), il s'agit de $f(x) = 1/(1 - 16x)$, car une écriture alternative de $1/(1 - 16x)$ est $1 + 16x + 16^2x^2 + 16^3x^3 + \cdots$, qui est la série génératrice de (u_n) (on a utilisé l'identité $1/(1-a) = 1 + a + a^2 + \cdots$, valable pour tout nombre a de valeur absolue inférieure à 1).

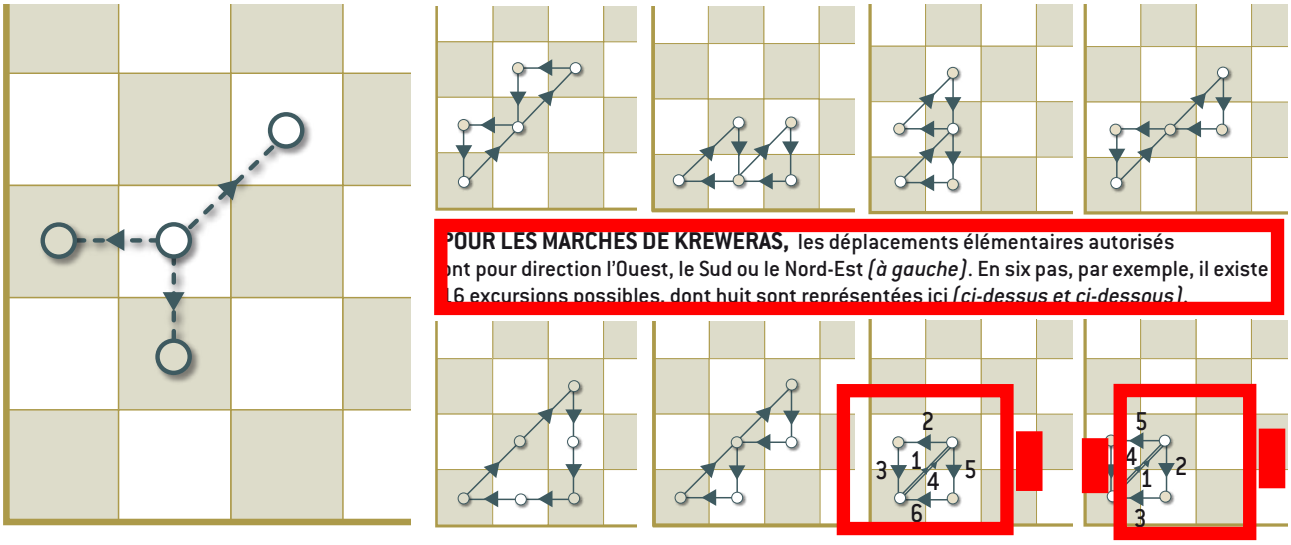
La fonction génératrice de $(1/v_n) = (1/n!)$ – qui est plus remarquable et facile à définir que celle de (v_n) – est la fonction exponentielle $f(x) = e^x$, dont le développement en série est en effet $1 + x + x^2/2! + x^3/3! + \cdots$

Enfin, la série génératrice des nombres de Fibonacci s'obtient en développant en série de puissances de x la fonction $f(x) = x/(1 - x - x^2)$.

Voici sur un exemple simple le principe de cette approche : si l'on nous donne six termes d'une suite, par exemple 0, 1, 1, 2, 3, 5, 8 (ce sont les premiers termes de la suite de Fibonacci, *voir l'encadré page 43*), et que l'on nous dit par ailleurs que cette suite vérifie une équation de récurrence d'ordre 2 (à coefficients constants), l'ordinateur propose une unique possibilité : la récurrence $v_{n+2} = v_{n+1} + v_n$.

100 dollars pour prouver en moins de cinq pages

En général, on ne dispose pas d'autant d'informations sur la suite que l'on désire reconstituer grâce à ses premiers termes. En particulier, l'ordre de la récurrence est une inconnue, et le trouver complique beaucoup la méthode. Mais Manuel Kauers et Doron Zeilberger ont surmonté cette difficulté et ont pu appliquer la méthode à la marche de Kreweras. Cette approche ne fonctionnait malheureusement pas pour la marche de Gessel, les calculs impliqués dépassant les capacités des ordinateurs ;



POUR LES MARCHES DE KREWERAS, les déplacements élémentaires autorisés ont pour direction l'Ouest, le Sud ou le Nord-Est *(à gauche)*. En six pas, par exemple, il existe 16 excursions possibles, dont huit sont représentées ici *(ci-dessus et ci-dessous)*.

mais Christoph Koutschan, de l'Institut RICAM en Autriche, trouva une astuce qui permit finalement d'étendre la méthode au cas de la marche de Gessel.

L'été 2008, la conjecture de Gessel devint ainsi le théorème de Kauers, Koutschan et Zeilberger, prouvé grâce à des calculs sur ordinateur. Croyant presque impossible l'existence d'une preuve courte et purement mathématique, Doron Zeilberger promit 100 dollars à quiconque prouverait ce théorème sans ordinateur et en moins de cinq pages.

Des nombres liés par une relation de récurrence

Parallèlement, Manuel Kauers et l'un de nous, Alin Bostan, collaboraient depuis le séminaire de janvier 2008 afin de démontrer que, quel que soit le point d'arrivée A fixé, les nombres de marches se terminant en A satisfont une relation de récurrence. Ils y sont parvenus et ont rendu public leur résultat en août 2008. Bien qu'utilisant également des méthodes informatiques, leurs idées étaient différentes de celles de Manuel Kauers, Christoph Koutschan et Doron Zeilberger. Elles ont permis d'obtenir pour la première fois une formule explicite pour la série génératrice à trois variables, dont les coefficients correspondent aux nombres de marches partant de l'origine et s'achevant au point A, pour tout point A.

Une question restait sans réponse : une preuve purement humaine, sans ordinateur, de ces résultats sur la marche de Gessel est-elle accessible ? Les marches dans un quart de plan apparaissent non seulement en combinatoire, mais dans de nombreux autres domaines : finance, files d'attente, biologie des populations, mécanique statistique, etc. Aussi des méthodes d'étude théorique de ces marches sont-elles apparues dès les années 1970. Les premières, qui concernaient surtout l'aspect aléatoire, sont dues au Français Guy Fayolle et aux Russes Roudolf Iasnogorodski et Vadim Malyshev. Ces chercheurs ont conçu une approche permettant de résoudre des équations fonctionnelles et d'obtenir des expressions explicites de leurs solutions en faisant appel à des techniques élaborées d'analyse complexe (branche de l'analyse mathématique portant sur les fonctions de variables z complexes, c'est-à-dire de la forme $z = x + iy$ où x et y sont des nombres réels et i le symbole vérifiant $i^2 = -1$).

En suivant cette voie, Irina Kurkova, de l'Université Paris 6, et l'un de nous, Kilian Raschel, ont obtenu en 2009 une expression de la fonction génératrice du modèle de Gessel sous la forme d'une intégrale. Cela permet de montrer l'existence de relations de récurrence pour les nombres d'excursions, mais pas de prouver la conjecture de Gessel.

Il existe aussi un modèle probabiliste pour les marches de Gessel, fondé sur un lien direct entre le nombre de chemins du quadrant allant d'un point A à un point B et la probabilité qu'un certain processus aléatoire aille de A à B tout en restant dans le quart de plan. Par cette démarche, en ramenant l'étude du nombre de marches de Gessel au calcul d'une certaine probabilité, le mathématicien chinois Sun Ping réussit en 2009 à prouver deux conjectures

BIBLIOGRAPHIE

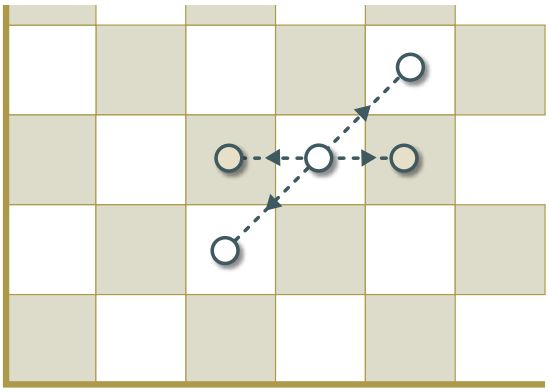
A. Bostan *et al.*, **A human proof of Gessel's lattice path conjecture**, prépublication arXiv:1309.1023, 2013.

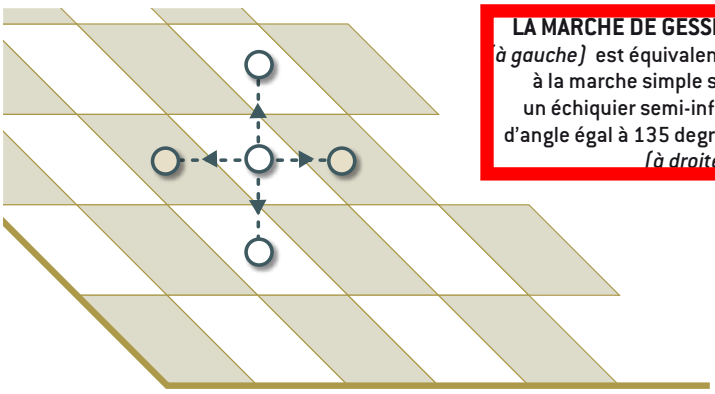
A. Bostan et M. Kauers, **The complete generating function for Gessel walks is algebraic**, *Proc. Amer. Math. Soc.*, vol. 138, pp. 3063-3078, 2010.

M. Bousquet-Mélou et M. Mishna, **Walks with small steps in the quarter plane**, *Contemporary Mathematics*, vol. 520, pp. 1-40, 2010.

K. Humphreys, **A history and a survey of lattice path enumeration**, *Journal of Statistical Planning and Inference*, vol. 140, pp. 2237-2254, 2010.

M. Kauers *et al.*, **Proof of Ira Gessel's lattice path conjecture**, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, vol. 106, pp. 11502-11505, 2009.





LA MARCHE DE GESSEL *(à gauche)* est équivalente à la marche simple sur un échiquier semi-infini d'angle égal à 135 degrés *(à droite)*.

proposées l'année précédente et apparentées à celle de Gessel, mais plus faibles.

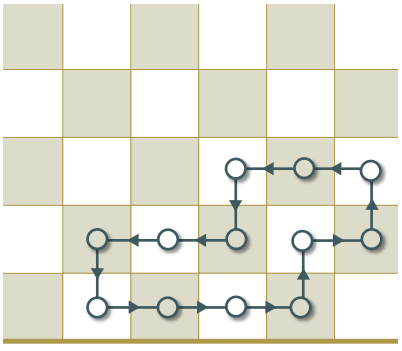
En 2013, en collaboration avec Irina Kurkova, nous avons pu fournir la première preuve purement humaine de la conjecture de Gessel. Notre approche n'utilise que des mathématiques du XIXe siècle (de l'analyse complexe pour l'essentiel). Cela peut paraître surprenant, si l'on compare avec la modernité et la puissance de la preuve par ordinateur rendue publique en 2008.

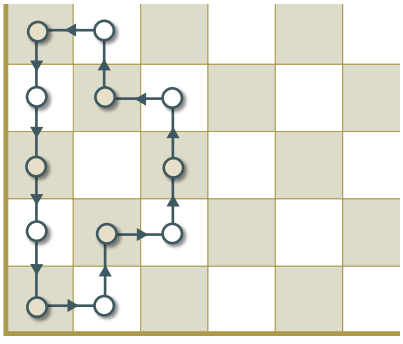
La démarche peut se résumer en disant que nous prenons trois fois de la hauteur (un procédé omniprésent en mathématiques : plutôt que de s'attaquer directement à un problème, il faut parfois changer d'échelle pour le faire céder).

Prouver sans ordinateur

D'abord, comme beaucoup avant nous, plutôt que de travailler directement sur les nombres de marches, nous considérons leur fonction génératrice. Ensuite, nous considérons non seulement la fonction génératrice des nombres d'excursions (marches partant et revenant à l'origine), mais celle, plus générale, des nombres de chemins partant de l'origine et se terminant en n'importe quel autre point du quart de plan. Enfin, nous étendons, par les méthodes de l'analyse complexe, le domaine sur lequel cette fonction génératrice est *a priori* définie.

En procédant ainsi, nous avons montré qu'une transformation simple de la fonction génératrice donne une fonction dotée d'une double périodicité (alors que des fonctions telles que le sinus n'ont qu'une seule périodicité). Plus précisément, cette fonction appartient à la famille des fonctions dites elliptiques, étudiées au XIXe siècle par des mathématiciens prestigieux, tels le Norvégien Niels Abel et les Allemands Carl Gustav Jacobi et Karl Weierstrass. La double périodicité nous a permis d'exprimer nos fonctions génératrices à l'aide de fonctions spéciales classiques (les « fonctions elliptiques de Weierstrass »).





DEUX EXCURSIONS EN 12 PAS pour la marche simple, l'une sur un demi-plan *(en haut)*, l'autre sur un quart de plan *(en bas)*.

Nous disposions ainsi d'une expression explicite pour la série génératrice des excursions, mais dans un langage très différent de celui intervenant dans la formule initiale proposée par Ira Gessel. Toute la difficulté, que nous avons heureusement pu surmonter, était alors de retrouver cette dernière en utilisant l'arsenal des identités et propriétés vérifiées par les fonctions elliptiques de Weierstrass.

Alors que nous avions presque finalisé d'une preuve « humaine » de la conjecture, Ira Gessel proposa en mars 2013 de nouvelles conjectures. Elles concernent l'existence de formules explicites pour le nombre de chemins partant de l'origine et se terminant en un point donné de l'un des axes. Il est vraisemblable que l'on puisse utiliser notre approche, pour laquelle le point d'arrivée n'est pas essentiel, afin de prouver ces nouvelles conjectures.

Toutefois, notre approche admet aussi des limites, puisqu'elle ne permet pas de répondre aux questions suivantes, qui font l'objet de recherches : que dire des marches où chaque déplacement élémentaire est plus grand que le pas du réseau, c'est-à-dire qui va au-delà des plus proches voisins ? Existe-t-il des formules pour les excursions des marches en trois dimensions, voire en dimension encore supérieure ? Peut-on trouver des preuves plus combinatoires, c'est-à-dire prenant davantage en compte la structure des chemins ? Enfin, notre preuve occupant environ 30 pages, est-il possible de trouver une preuve en moins de cinq pages, objet de la récompense promise par Doron Zeilberger ? L'avenir seul répondra.

Actuellement en kiosque

DOSSIER POUR LA SCIENCE

Le cri du cœur de Jane GOODALL

La plus célèbre spécialiste des chimpanzés ne veut pas baisser les bras

DOSSIER POUR LA SCIENCE - PRIMATOLOGIE - PALÉONTOLOGIE - ÉTHOLOGIE - PSYCHOLOGIE

Leur avenir est entre nos mains

Nos cousins les grands singes

LE YÉTI A EXISTÉ !

Les humains l'ont rencontré il y a 3 millions d'années

LES GORILLES

De nouvelles preuves de leur culture

M 01930 - 86 - F: 6,95 € - RD

Belgique : 8,20 € - Canada / S : 11,50 CAD - Guadeloupe/Mt Martin /S : 8,25 € - Guyane /S : 8,25 € - Luxembourg : 7,60 € - Maroc : 90,00 Dh - Martinique /S : 8,25 € - Nlle Calédonie Wallis /A : 2200 F CFP - Nlle Calédonie Wallis /S : 1170 F CFP - Polynésie Française /A : 2200 F CFP - Polynésie Française /S : 1170 F CFP - Portugal : 7,90 € - Réunion /S : 8,25 € - Suisse : 15 CHF.

N° 86 Janvier-Mars 2015

pourlascience.fr

www.pourlascience.fr

Le site de référence de l'actualité scientifique internationale

Disponible sur App Store

DISPONIBLE SUR Google play

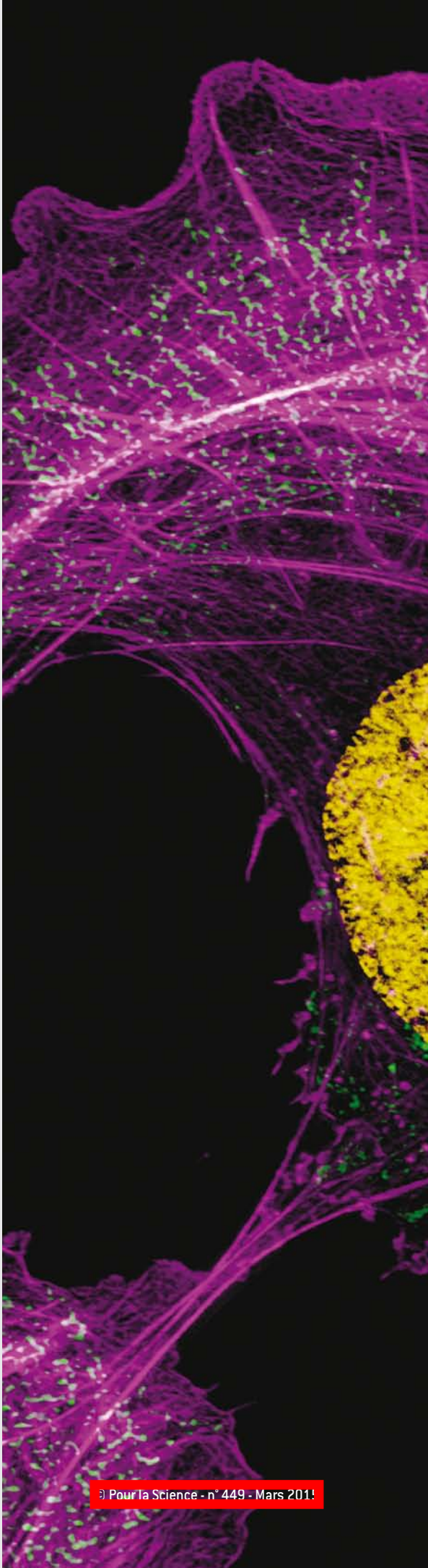
Voir la vie en grand

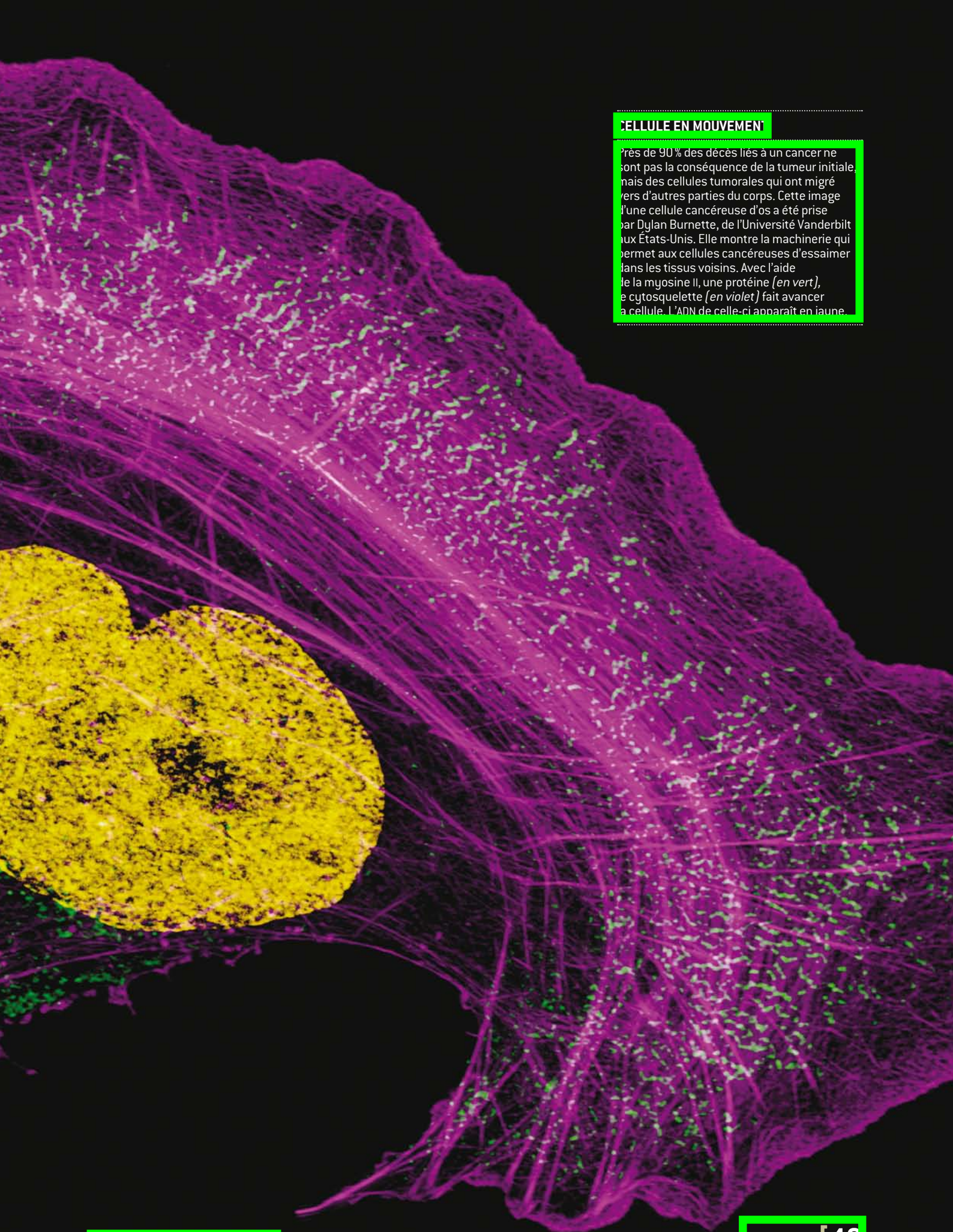
Kate Wong

D'abord outil pour les chercheurs, le microscope est aussi devenu un instrument au service de l'art. Pour sublimer les détails du vivant invisibles à l'œil nu, il est à l'honneur dans le concours *Olympus BioScapes*.

Déjà en 1665, le monde microscopique fascinait. Cette année-là, Robert Hooke, un jeune scientifique anglais, publiait *Micrographia*, un livre devenu rapidement un succès de librairie. L'auteur y a consigné ses observations d'un monde jusque-là invisible et quasi inconnu : le vivant à l'échelle du minuscule. Pour partager ce qu'il voyait avec son microscope, Hooke a dessiné des illustrations minutieuses et a ainsi décrit les articulations des pattes d'une puce, l'œil à facettes d'un syrphe (une mouche butineuse), les formes étoilées des flocons de neige. Mais l'une de ses plus remarquables observations portait sur de minces tranches de liège. Le microscope révéla à Hooke des compartiments dessinant des nids d'abeilles, compartiments que le scientifique nomma « cellules ».

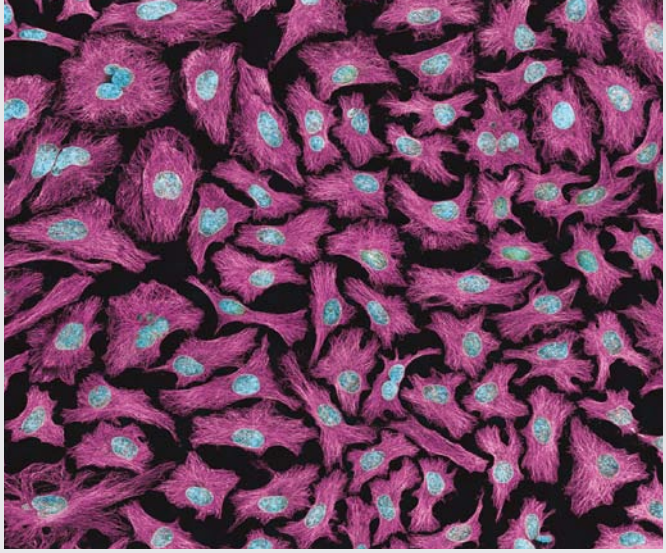
Aujourd'hui, 350 ans plus tard, les microscopes continuent de dévoiler des aspects extraordinaires du monde qui nous entoure, grâce notamment à de nouvelles techniques numériques de visualisation. Ces images combinent parfois des travaux de recherche, visant à mieux comprendre la nature, et des effets esthétiques remarquables. Le concours international *Olympus BioScapes* de l'image numérique porte justement sur cette fusion de la science et de l'art. L'édition 2014 de la compétition a ainsi récompensé de nombreuses et spectaculaires images du monde microscopique, de la carapace tentaculaire d'un organisme du plancton marin datant d'il y a 37,6 millions d'années à la langue multitubulaire d'un grillon domestique. Toutes ces images démontrent que le beau est partout autour de nous : il suffit de regarder à travers le bon objectif.





CELLULE EN MOUVEMENT

Près de 90 % des décès liés à un cancer ne sont pas la conséquence de la tumeur initiale, mais des cellules tumorales qui ont migré vers d'autres parties du corps. Cette image d'une cellule cancéreuse d'os a été prise par Dylan Burnette, de l'Université Vanderbilt aux États-Unis. Elle montre la machinerie qui permet aux cellules cancéreuses d'essaimer dans les tissus voisins. Avec l'aide de la myosine II, une protéine *(en vert)*, le cytosquelette *(en violet)* fait avancer la cellule. L'ADN de celle-ci apparaît en jaune.

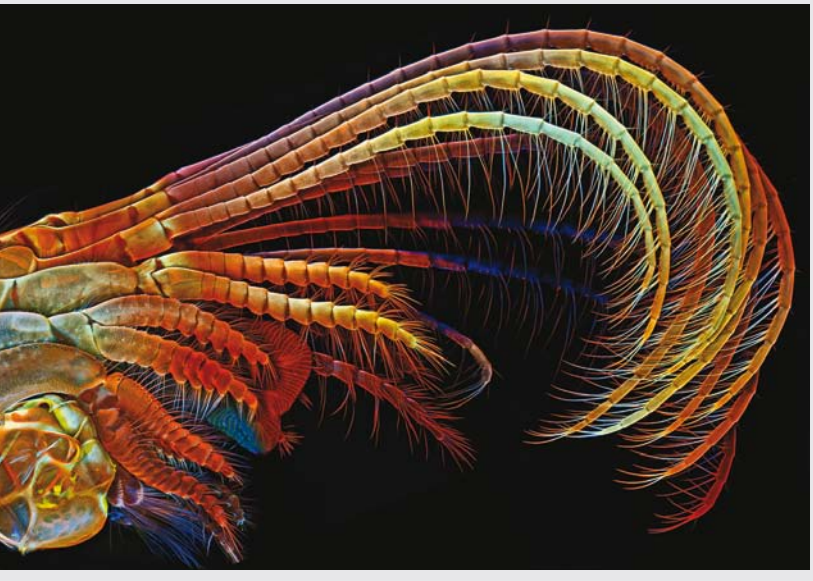


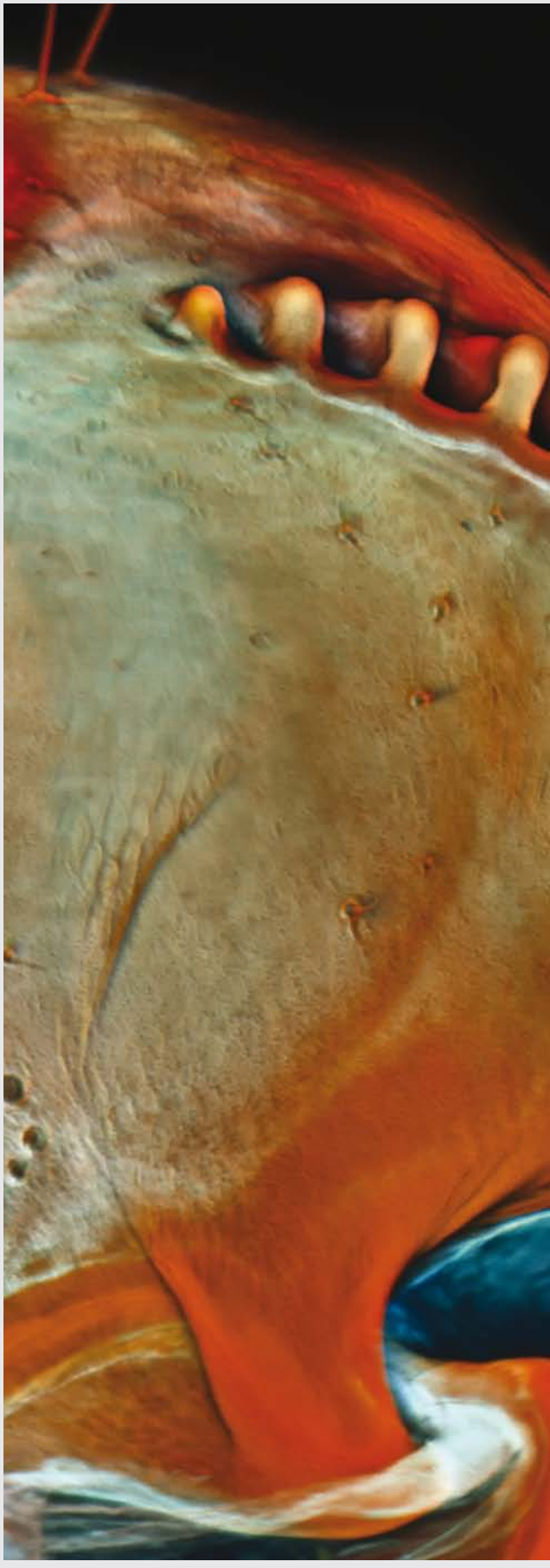
DES CELLULES IMMORTELLES

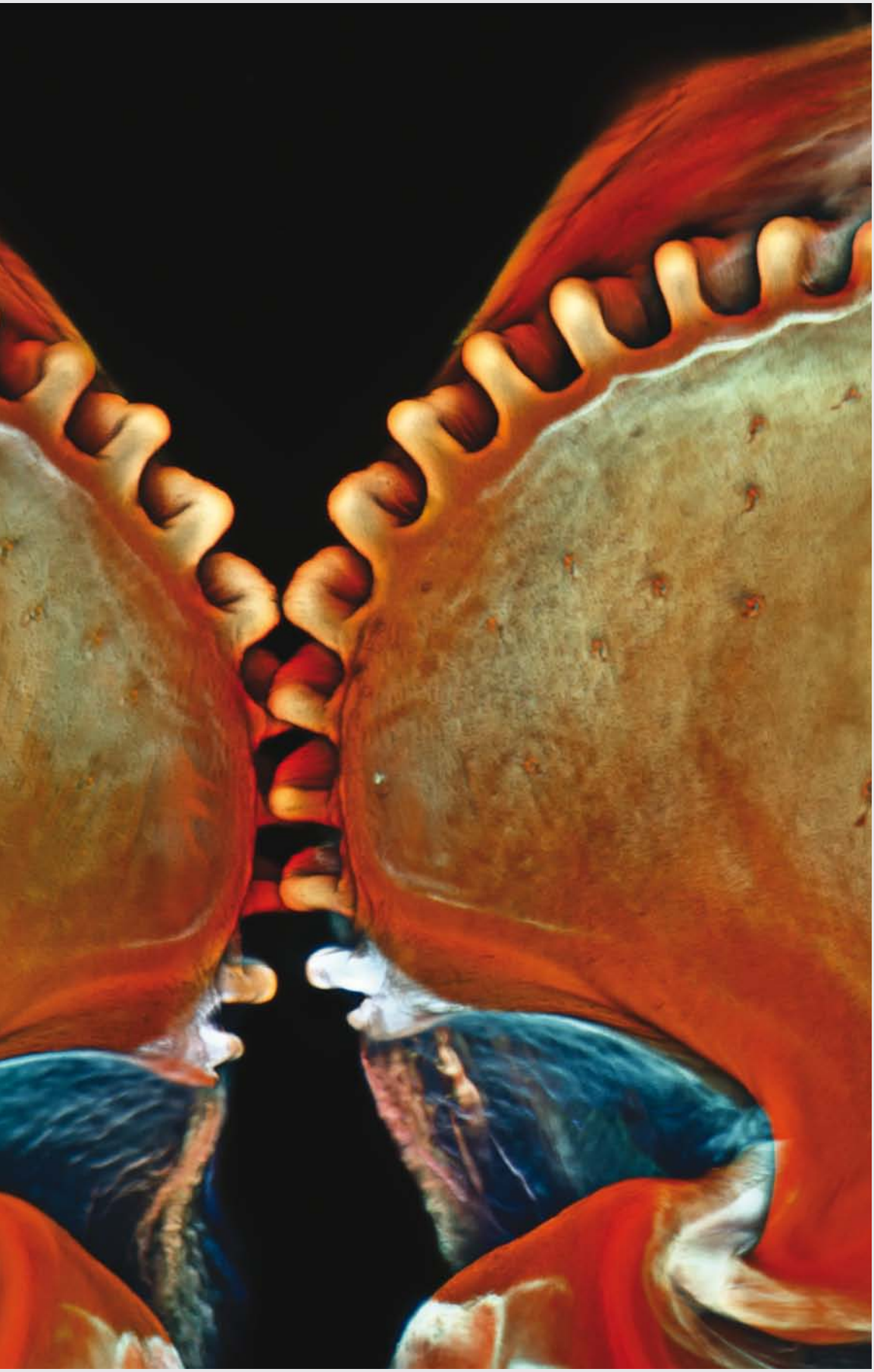
Prélevées sur une métastase de la patiente Henrietta Lacks (1920-1951) atteinte d'un cancer du col de l'utérus, ces cellules sont immortelles. En culture, elles se divisent en permanence et rapidement. Les chercheurs utilisent fréquemment ces cellules, dites HeLa, pour la recherche médicale. Thomas Deerinck, du Centre de microscopie et de recherche en imagerie de l'Université de Californie à San Diego, a marqué les cellules avec des colorants fluorescents. La tubuline, une protéine du cytosquelette de la cellule, apparaît en rose ; l'ADN est coloré en bleu.

LES FOUETS DES CIRRIPEDES

Les cirripèdes, dont font partie les balanes, sont des crustacés surtout connus sous leur forme adulte, quand ils se fixent sur des rochers ou la coque des bateaux et s'entourent d'une carapace blanche. Devenus immobiles, ils déploient pour se nourrir des fouets munis de soies, qui recueillent des particules organiques en suspension dans l'eau. Le neurobiologiste Igor Siwanowicz, de l'Institut médical Howard Hughes aux États-Unis, a réalisé l'image ci-dessous en utilisant des colorants qui se fixent dans la chitine de la carapace.

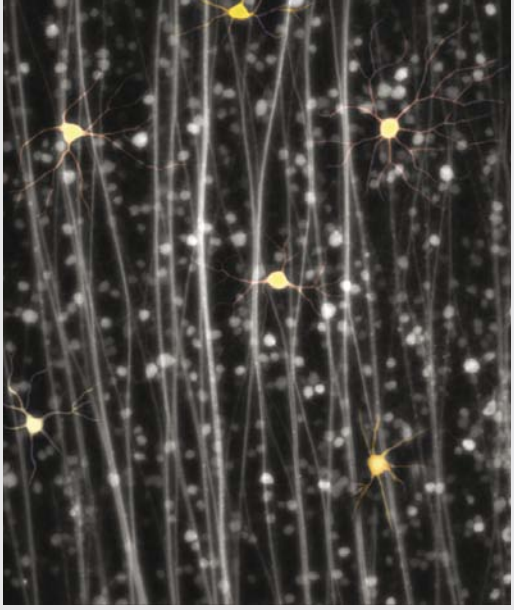






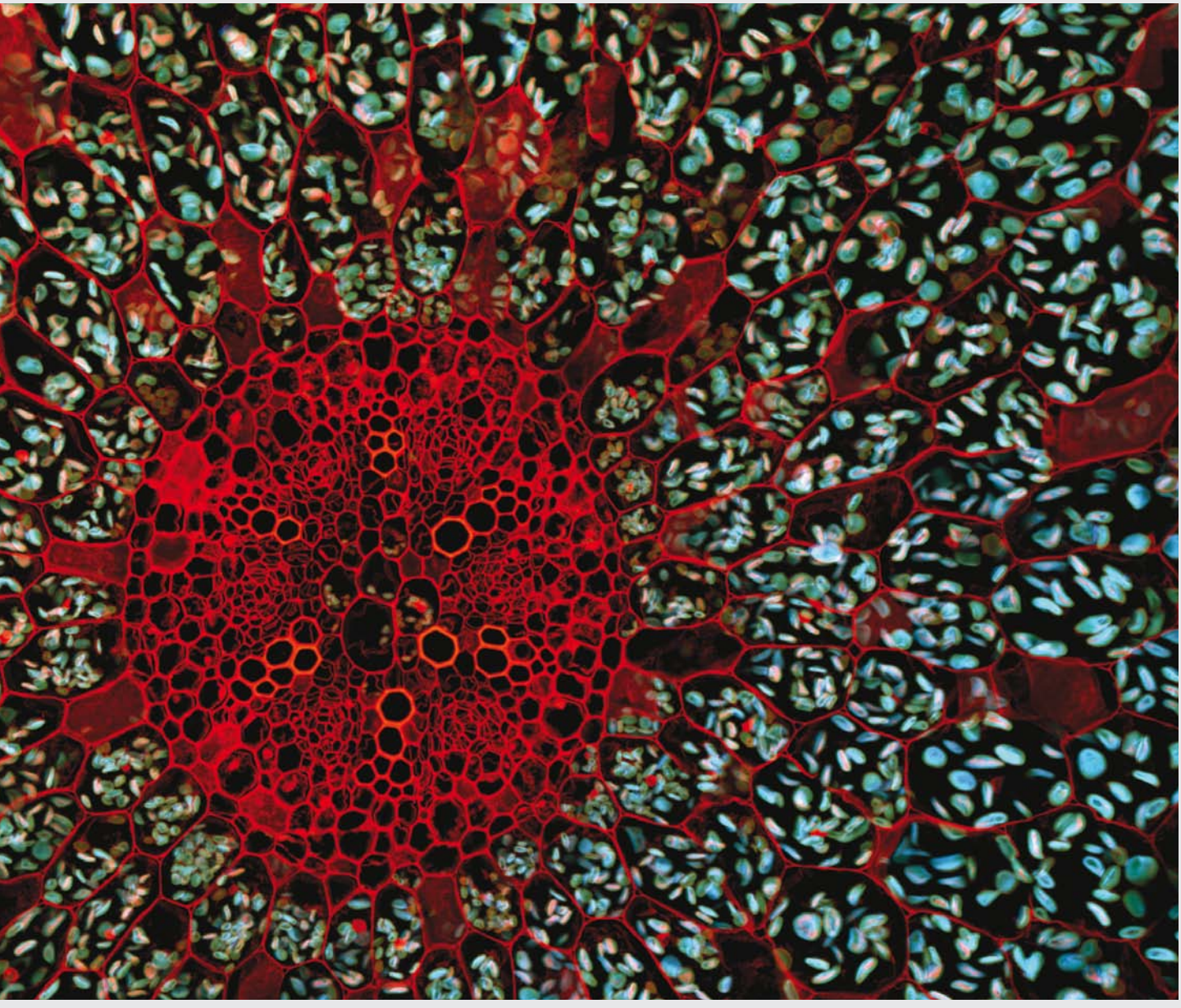
ENGRENAGES D'INSECTE

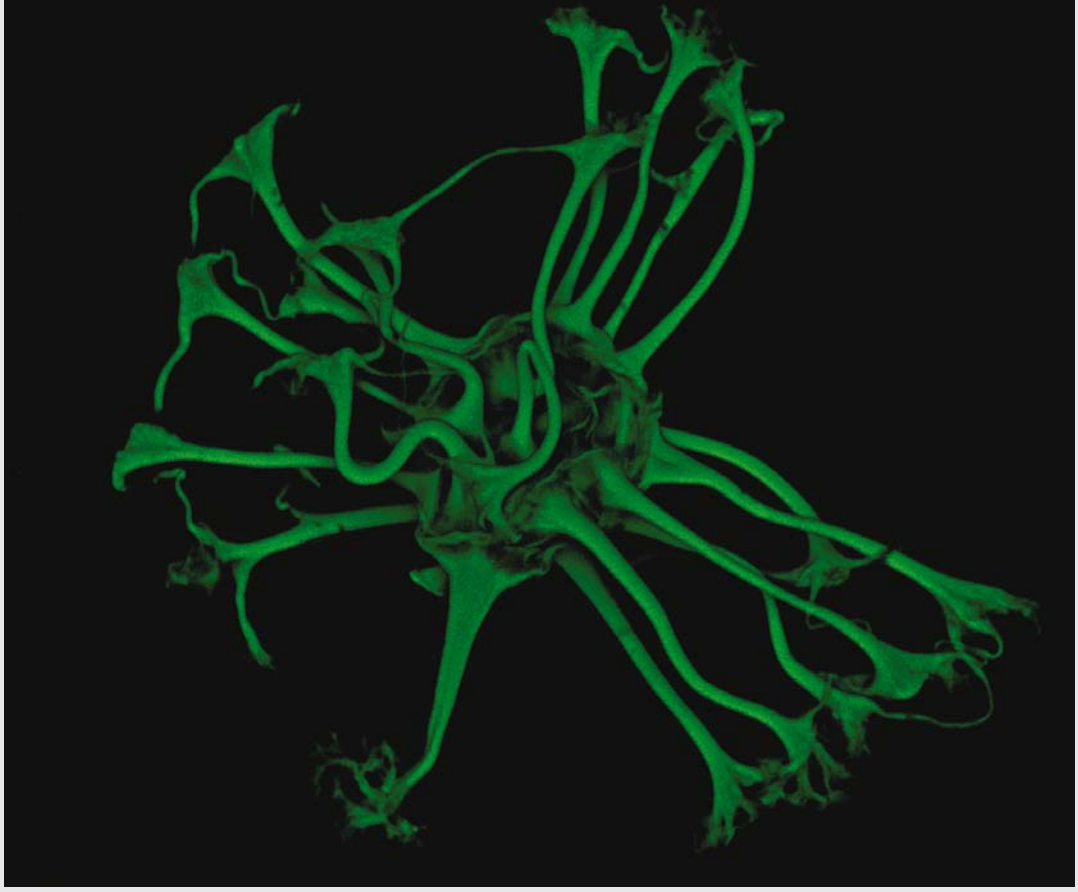
Les pattes postérieures de la nymphe de la cigale possue, une cicadelle (insecte connu pour son habilité à sauter), présentent un système d'engrenages qui synchronise le mouvement des pattes lors des bonds. Ce mécanisme, décrit en 2013 par Malcolm Burrows, de l'Université de Cambridge, et ses collègues est le premier exemple d'engrenage biologique observé. Igor Siwanowicz a utilisé la même technique pour visualiser ce dispositif de 0,75 millimètre de diamètre que pour observer les fouets des cirripèdes *(page ci-contre)*



CELLULES RETINIENNES

La rétine est une couche de neurones qui tapisse le fond de l'œil. Elle capte la lumière qui lui parvient et la convertit en signaux électriques. Les cellules ganglionnaires de la rétine, en jaune sur cette image obtenue chez le cochon d'Inde par Chris Sekirnjak quand il était postdoctorant à l'Institut d'études biologiques Salk, en Californie, transmettent une impulsion électrique vers le cerveau lorsque de la lumière est détectée. Les lignes verticales sont des axones qui portent l'information depuis ces neurones vers le cerveau *via* le nerf optique. Les cellules ganglionnaires ont un diamètre d'environ 10 micromètres





UN MICROMONSTRE DES MERS

Le fossile est un kyste d'un organisme planctonique, c'est-à-dire une forme dormante adoptée par le plancton dans l'attente de conditions plus favorables. Il a été découvert plusieurs centaines de mètres sous le fond de la mer du Groenland. Stanislav Vitha, de l'Université Texas A&M, a pris cette vue où l'organisme, qui mesure 80 micromètres, réémet une lumière verte quand il est éclairé par un laser bleu. L'image montre que la microstructure du kyste est restée bien préservée, malgré les millions d'années écoulées.

UNE ARAIGNEE CRABE

Geir Drange, un microscopiste amateur norvégien, a pris ce gros plan d'une araignée crabe *(Misumera vatia)*, accrochée à une feuille d'érable sèche. Cet arachnide peut changer de couleur pour se fondre dans son environnement (souvent une fleur) – une ruse particulièrement utile pour surprendre ses proies.

SYSTEME VASCULAIRE VEGETAL

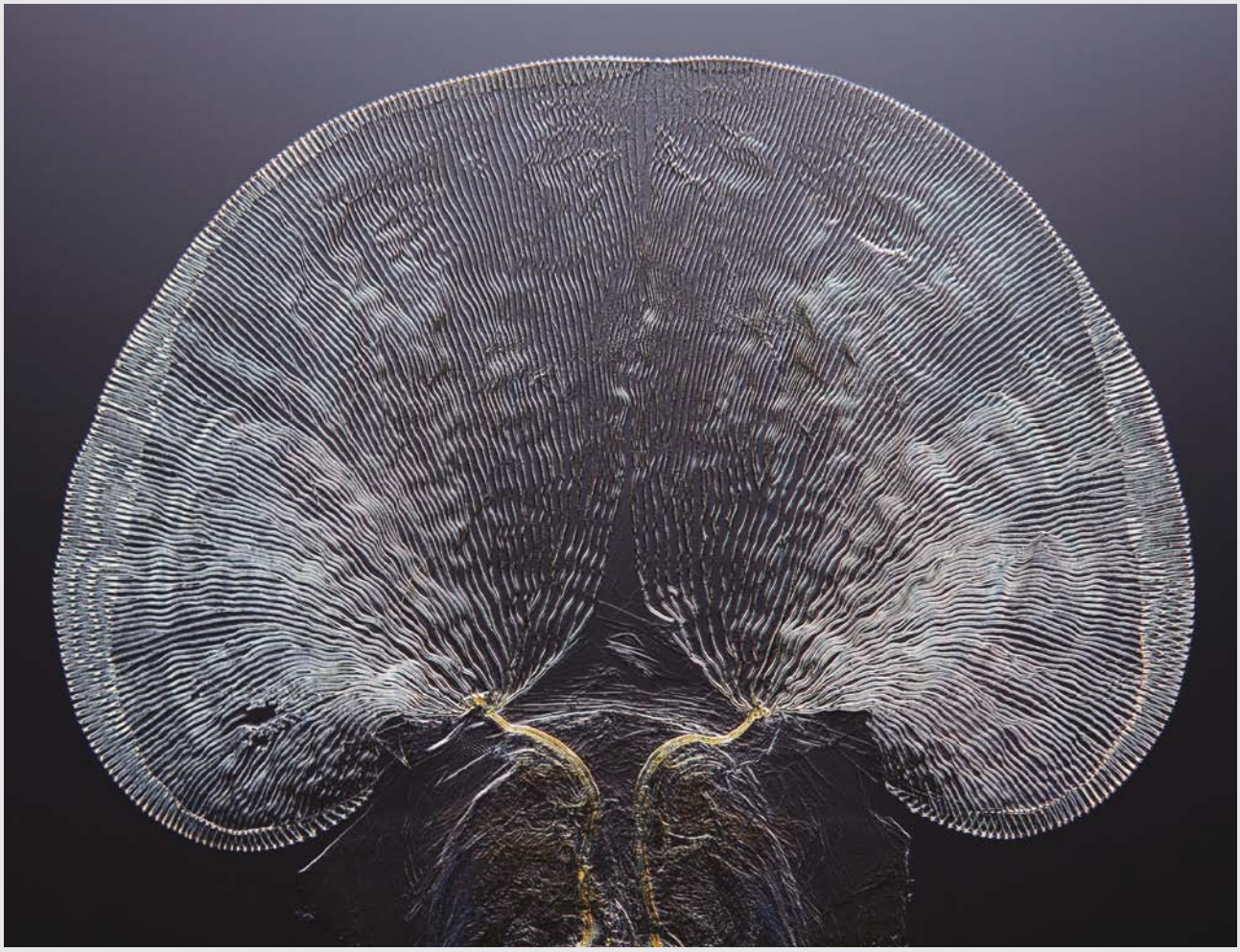
Cette coupe de la tige d'une renoncule, une plante herbacée tel le bouton d'or, en révèle la structure complexe. Les parois cellulaires sont en rouge et les chloroplastes – organites présents dans les cellules et qui captent la lumière du soleil – sont en bleu-blanc. Fernán Federici, de l'Université pontificale catholique du Chili, a créé cette image en utilisant plusieurs colorants fluorescents, trois lasers de longueurs d'onde différentes et un microscope confocal.

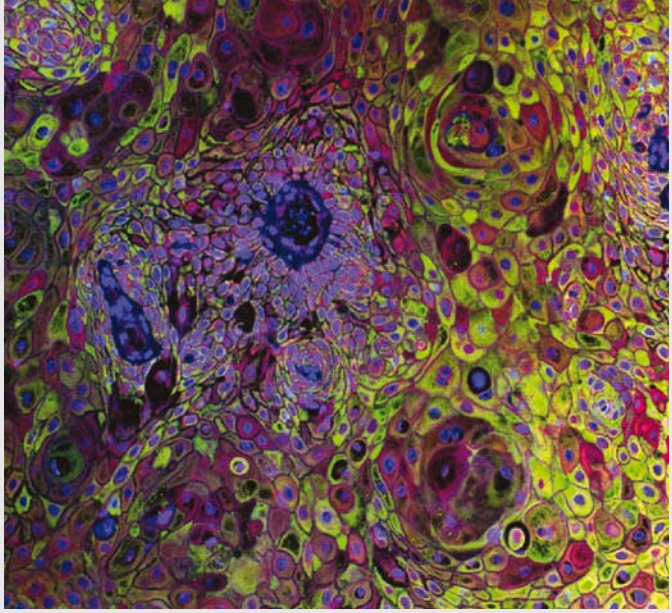
LE DEVELOPPEMENT D'UNE ANGUILLE DU JAPON

Le colorant met en évidence le développement, de l'éclosion de l'œuf *(à gauche)* au huitième jour *(à droite)*, de l'anguille du Japon, qui est naturellement transparente à l'état juvénile. Tora Bardal, de l'Université norvégienne de science et technologie, à Trondheim, a ainsi pu suivre la formation rapide de la tête de l'animal *(partie supérieure des clichés)* avec l'apparition des yeux et de la bouche. Au huitième jour, l'anguille peut commencer à se procurer elle-même de la nourriture, quand le jaune de l'œuf qui sert à alimenter l'embryon a quasiment disparu.

LA LANGUE DU GRILLON DOMESTIQUE

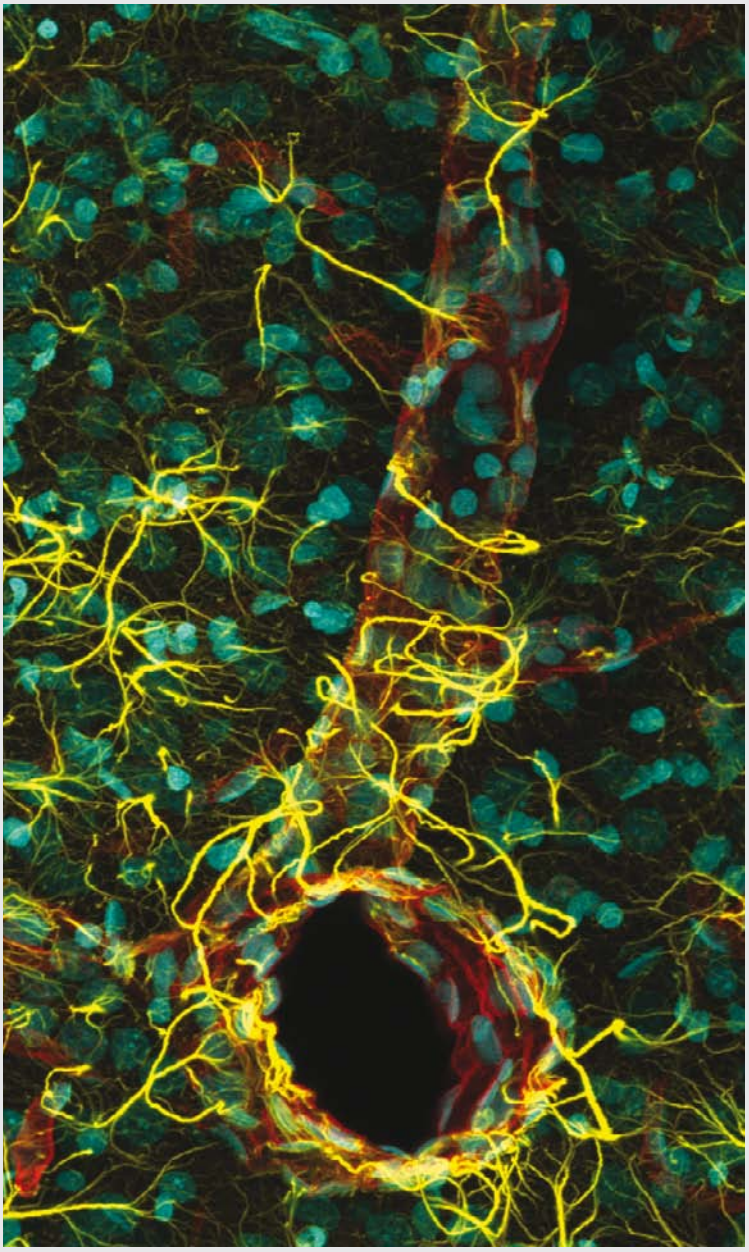
L'extrémité de la langue d'un grillon domestique est particulièrement complexe. Elle est formée de tubes remplis d'air *(en argenté)*. Ces tubes gonflent la langue et restent ouverts grâce à la chitine dont ils sont constitués. Le rôle exact de cette structure complexe reste à découvrir, précise l'auteur de cette image, le photographe britannique David Maitland.





CANCER DE LA PEAU

Sur ce cliché d'une forme de cancer de la peau – le carcinome spinocellulaire – Gopinath Meenakshisundaram et Prabha Sampath, de l'Institut de biologie médicale de Singapour, ont mis en évidence la concentration importante de protéine DIAPH1 *(en rouge)*. Celle-ci est produite par les kératinocytes – les cellules constituant 90 % de l'épiderme. Elle favoriserait la diffusion du cancer vers les poumons et les ganglions lymphatiques. La kératine, une autre protéine des kératinocytes, apparaît en vert tandis que le noyau des cellules est coloré en bleu.



DES ETOILES DANS LE CERVEAU DU RAT

Alors étudiante à l'Institut polytechnique Rensselaer, aux États-Unis, Madelyn May a exploré le cortex cérébral – ou substance grise – des rats pour étudier les cellules gliales qui soutiennent et protègent les neurones. Ces cellules apportent les nutriments et l'oxygène, éliminent les cellules mortes et combattent les agents pathogènes. Cette image met en évidence l'association entre les cellules gliales en forme d'étoile, ou astrocytes *(en jaune)*, et les vaisseaux sanguins *(en rouge)*.

Kate WONG est rédactrice et chef de rubrique à *Scientific American*.

Pour plus d'informations sur le concours *Olympus BioScapes* : www.OlympusBioScapes.com

pourlascience.fr Pour voir le diaporama connectez-vous sur http://bit.ly/pls449_olympus

LE JET-STREAM POLAIRE se dérègle-t-il ?

Jeff Masters

Ces dernières années, de nombreux aléas climatiques ont marqué les étés et les hivers de l'hémisphère nord. Une perturbation du jet-stream polaire, peut-être due à la fonte de la banquise arctique, est en jeu

Durant l'hiver 2013-2014, le jet-stream polaire est devenu fou. Ce courant aérien rapide s'est aventuré bien plus loin vers le Sud que d'habitude, glaçant l'Est des États-Unis jusqu'à Atlanta, une ville subtropicale… Dans le même temps, la barrière de haute pression que ce « courant-jet » – son autre nom français – avait installé au-dessus de la Californie y a créé le plus chaud hiver depuis 1850.

En Europe, après avoir fait connaître à l'Angleterre et au Pays de Galles leur hiver le plus pluvieux depuis 1766 au moins, le jet-stream a déclenché une succession de tempêtes destructrices et entraîné des températures si élevées que des incendies de forêt se sont déclenchés spontanément en Norvège en janvier ! Par ailleurs, après que les organisateurs des Jeux olympiques d'hiver de Sotchi eurent lutté pendant toute la compétition contre la fonte de la neige, un tiers de la Bosnie se retrouva noyé sous les eaux de pluie au printemps suivant.

Nous verrons pourquoi ces effets du jet-stream polaire sont tout à fait anormaux. Puis, en examinant l'explication que certains climatologues proposent à ses errements, et les fortes critiques qu'elle suscite, nous constaterons que toutes ces idées ont en commun de faire jouer un rôle essentiel au changement climatique.

L'ESSENTIEL

- Le jet-stream polaire est un courant d'air rapide évoluant à une dizaine de kilomètres d'altitude.
- Ces dernières années, ses méandres entre Nord et Sud se sont amplifiés, ce qui a déclenché une série d'aléas climatiques.
- Pour certains chercheurs, la forte réduction de la banquise arctique est à l'origine du phénomène ; d'autres sont en désaccord avec cette explication.
- Quoi qu'il en soit, si le jet-stream polaire reste perturbé, sécheresses, inondations et vagues de chaleur vont se succéder.

Les ondes de Rossby

Tel un grand serpent, le jet-stream polaire ondule sous les latitudes moyennes. Nommés ondes de Rossby ou ondes planétaires, ses gigantesques méandres l'amènent loin vers le Sud, puis le ramènent vers le Nord. Typiquement, ces ondes traversent les États-Unis en trois à cinq jours, où elles font littéralement « la pluie et le beau temps ». Quand l'ondulation s'amplifie, les masses d'air déplacées par le courant-jet parcourent le globe plus lentement, voire restent

LES EMBRUNS ISSUS D'UN LAC gèlent à peine retombés, lors d'une tempête hivernale dans le Michigan

stationnaires, ce qui engendre des conditions climatiques inhabituelles pendant un certain temps, plusieurs semaines parfois. C'est ce qui s'est produit pendant l'hiver 2013-2014 ; de fait, Shih-Yu Wang de l'Université d'État de l'Utah, a établi que le jet-stream de cette période présentait une onde d'une amplitude inédite.

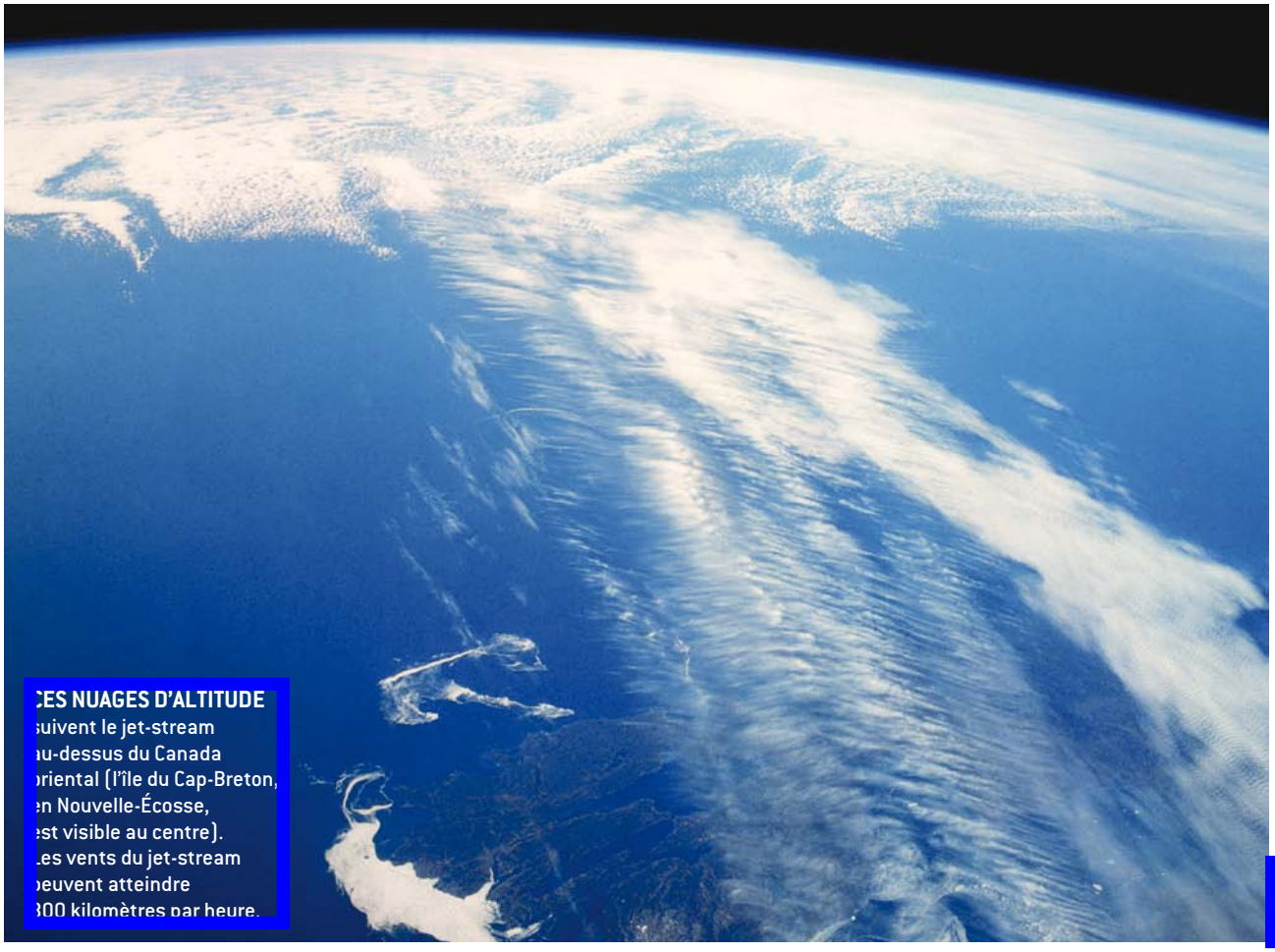
Un cas exceptionnel ? Peut-être pas, si l'on prend conscience de la répétition des événements météorologiques violents associés aux configurations tourmentées du jet-stream. Durant l'été 2010, la pire vague de chaleur jamais enregistrée en Russie a tué… 55000 personnes. Au même moment, le déluge qui s'abattait sur le Pakistan y entraînait les pires inondations de l'histoire du pays. Dans l'Oklahoma, l'été 2011 fut le plus chaud jamais noté dans un État américain, et il fut suivi en 2012 par la pire sécheresse ayant sévi aux États-Unis depuis les années 1930…

Qu'ont de commun les configurations du courant-jet polaire observées lors de ces événements ? Selon une étude publiée en 2013 par Vladimir Petoukho et son équipe, de l'Institut de recherche de Potsdam, sur les effets du changement climatique, les méandres du jet-stream se propageant habituellement vers l'Est « se sont tous immobilisés et amplifiés ». Or le phénomène est déjà ancien : pendant les 11 étés qui se sont égrainés entre 2001 et 2012, les blocages des méandres du courant-jet polaire ont duré de quelques jours à plusieurs mois. Par ailleurs, ils ont aussi été deux fois plus fréquents qu'au cours des 22 années précédentes.

Le réchauffement climatique en cause ?

L'humanité a-t-elle perturbé le système climatique d'une façon qui affecte le grand courant substratosphérique ? Au cours des 150 dernières années, la combustion de charbon, de gaz naturel et de pétrole a augmenté de plus de 40 % la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone, le principal gaz à effet de serre après la vapeur d'eau. La quantité d'énergie solaire réfléchie par la Terre a aussi changé parce que nous avons créé des champs, des pâturages et des villes sur plus de la moitié des terres de la planète. Les nuages de poussières rejetées par les industries et les automobiles modifient aussi la réflexion et l'absorption du rayonnement solaire. L'augmentation de la température moyenne de la planète qui en a résulté depuis 1900 a fait disparaître la moitié de la surface de banquise arctique estivale. Cela modifie aussi le bilan radiatif de la Terre, puisque la glace renvoie 60 % du rayonnement solaire qu'elle reçoit. Pour Shih-Yu Wang et ses collègues, sans le réchauffement climatique d'origine anthropique (humaine), la forme du jet-stream n'aurait pas tant changé.

Le nouveau comportement du grand courant subatmosphérique est d'autant plus préoccupant que la réaction du système climatique aux facteurs dont il dépend n'est pas linéaire. En particulier, elle inclut des effets de seuil. C'est pourquoi les climatologues discutent beaucoup de la possibilité



CES NUAGES D'ALTITUDE suivent le jet-stream au-dessus du Canada oriental (l'île du Cap-Breton, en Nouvelle-Écosse, est visible au centre). Les vents du jet-stream peuvent atteindre 300 kilomètres par heure.

que le système climatique de notre planète ait durablement basculé vers un nouveau régime. Ils se demandent en particulier si les errements du jet-stream ne pourraient pas être dus au réchauffement régional le plus rapide de toute la planète : celui de l'Arctique.

Un courant d'air méandreux

Pour mieux comprendre la question, commençons par décrire la structure générale d'un courant-jet. Situés entre 9 et 14 kilomètres d'altitude, ces grands couloirs de vent font le tour de la planète dans les deux hémisphères. Le fait que leurs latitudes varient suivant les saisons est important, car ce sont les courants-jets qui guident les dépressions porteuses de précipitations. Celui qui nous intéresse plus particulièrement ici – le jet-stream polaire – court normalement au-dessus du centre des États-Unis et vient s'épuiser au-dessus de l'Europe. En été, il s'approche de la frontière canadienne. De grandes ondes de Rossby le caractérisent, qui influencent beaucoup la météorologie : là où le jet-stream polaire s'incurve vers le Nord, se dessine une crête de haute pression, de sorte que de l'air chaud s'écoule du Sud vers le Nord ; là où le jet-stream s'incurve vers le Sud, se forme une vallée dépressionnaire, et de l'air froid va du Nord au Sud.

Le jet-stream polaire trouve son origine dans le transport de l'énergie des tropiques vers les pôles *(voir les deux pages suivantes)*. Par ailleurs, l'atmosphère accumule plus ou moins d'énergie en fonction du flux solaire, de la forme et de la position des continents, des océans et des courants océaniques, de la présence ou non de chaînes de montagnes, de la quantité de gaz à effet de serre et de poussières, etc. Selon l'évolution de ces facteurs d'une région ou d'une saison à l'autre, les masses d'air qui la composent adoptent des modes de circulation différents, comparables aux modes de vibration d'un système résonnant : ce que l'on nomme des téléconnexions atmosphériques. Une certaine variabilité due à ces téléconnexions peut modeler le jet-stream polaire, de sorte qu'il est difficile de savoir si son comportement récent dénote ou pas un changement durable.

Les deux plus importantes téléconnexions de l'hémisphère Nord sont d'une part le couple associant El Niño – un réchauffement saisonnier de l'eau du Pacifique dû au courant marin du même nom, qui suit un cycle de trois à huit ans – à l'oscillation australe – une oscillation de la pression atmosphérique dans le Pacifique Sud ; et d'autre part l'oscillation arctique – une fluctuation variable de semaine en semaine de la pression au niveau de la mer entre l'Arctique et les latitudes moyennes.

Nommée ENSO (de l'anglais *El Niño–Southern Oscillation*) dans le jargon climatologique, la première téléconnexion a pour effet d'attirer le jet-stream polaire vers le Sud au-dessus du Pacifique. L'oscillation arctique, la deuxième oscillation, rend pour sa part possible des méandres du jet-stream de grande amplitude, lorsqu'une baisse des différences de pression entre latitudes hautes et moyennes affaiblit ses vents ; cela explique que de l'air froid s'aventure en hiver loin au Sud au-dessus de l'Est des États-Unis, de l'Europe occidentale et de l'Asie orientale.

Or ces téléconnexions atmosphériques peuvent se contrecarrer ou au contraire se renforcer, car elles sont entrelacées. Un changement de l'état de base de l'atmosphère pourrait donc modifier le fonctionnement de l'ENSO et de l'oscillation arctique, et, partant, celui du jet-stream polaire. Les conformations inhabituelles observées récemment s'expliquent-elles de cette façon ?

Une situation jamais vue par les climatologues

C'est ce qu'a pensé Jennifer Francis de l'Université de Rutgers, quand elle a constaté la conformation prise par le jet-stream en 2011. Un jet-stream extrêmement méandreux a en effet cohabité une partie de l'année en question avec un événement La Niña (l'inverse d'un événement El Niño) d'intensité faible à modérée, une situation que les climatologues n'avaient jamais vue. Pour l'expliquer, Jennifer Francis émit l'hypothèse que cet événement inédit était relié à la diminution de la superficie de banquise arctique, laquelle influerait sur l'oscillation arctique. Selon ses propres mots, la question n'est pas de savoir si la diminution de la banquise affecte la circulation atmosphérique, mais plutôt : comment ne le pourrait-elle pas ?

L'Arctique se réchauffe en effet deux fois plus vite que le reste de l'hémisphère Nord, phénomène que l'on nomme « amplification arctique ». Selon Jennifer Francis, l'amplification arctique pourrait perturber

L'AUTEUR

Jeff MASTERS, météorologue américain, dirige l'entreprise de prévisions météorologiques *Weather Underground*. Il tient le blog météo *WunderBlog*.

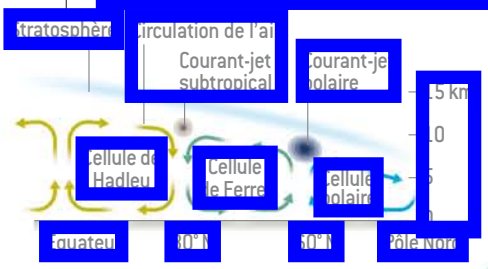
Qui a découvert le courant-jet ?

Des cerfs-volants puis des ballons ont signalé la présence de vents rapides de haute altitude dès le XIXe siècle. Mais le météorologue japonais Oishi Wasaburo (1874-1950) fut le premier à en mesurer la vitesse par des lâchers de ballons-sondes depuis le Mont Fuji. L'Occident, qui ignorait ces travaux, découvrit l'existence de « fortes rivières d'air » à haute altitude grâce à l'aviateur américain Wiley Post (1898-1935) à la fin des années 1920.

Dans chaque hémisphère, deux grands courants rapides de haute altitude – ou jet-streams – font le tour de la Terre : le jet-stream polaire et le jet-stream subtropical. Les ondulations du courant polaire s'amplifient parfois, amenant de l'air anormalement chaud ou froid vers de vastes régions continentales. Le blocage de ces ondulations plusieurs semaines d'affilée entraîne vagues de chaleur et sécheresses, inondations ou gels prolongés. Deux causes possibles de ces grandes ondulations sont avancées, qui font notamment intervenir le changement climatique *(voir la page ci-contre)*.

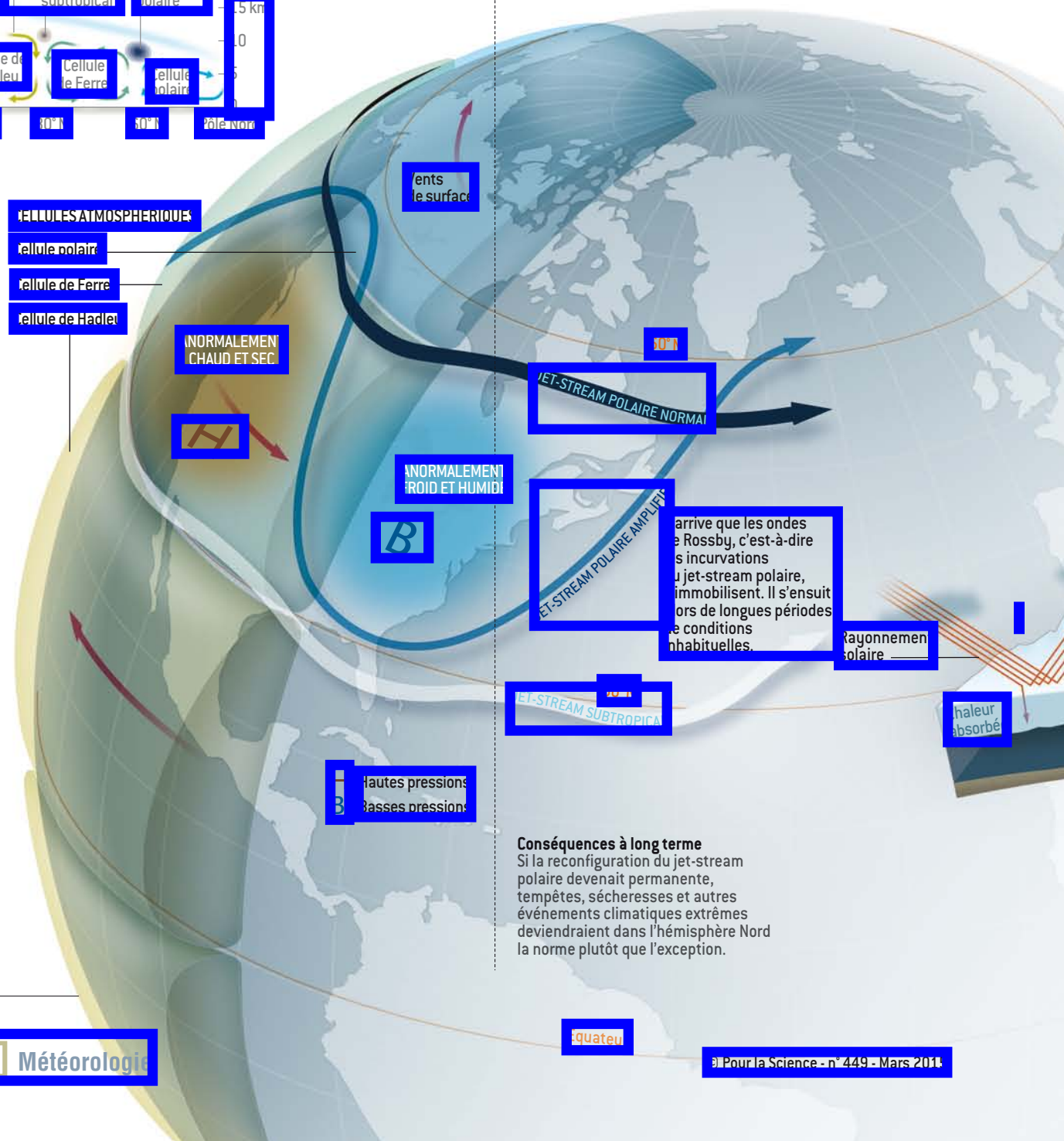
LA FORMATION DU JET-STREAM

L'équateur recevant plus d'énergie solaire que les pôles, l'air chaud s'y élève, se heurte à la stratosphère, puis s'écoule vers les pôles. La rotation de la Terre entraîne une circulation de cet air au sein des cellules polaires et subtropicales, aux limites desquelles des jet-streams naissent afin d'équilibrer les différences de pression entre cellules.



QUAND LES JET-STREAMS ONDULENT, FROID OU CHAUD S'ACCENTUENT

Quand les ondulations d'un jet-stream polaire s'amplifient, d'énormes masses d'air chaud parviennent bien plus loin au Nord qu'à l'habitude sous certaines longitudes, tandis que des masses d'air froid envahissent le Sud sous d'autres longitudes. Ces ondulations se déplacent vite et changent les conditions météorologiques en quelques jours.



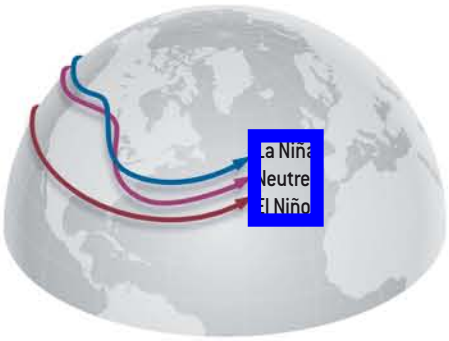
Il arrive que les ondes de Rossby, c'est-à-dire les incurvations du jet-stream polaire, s'immobilisent. Il s'ensuit alors de longues périodes de conditions inhabituelles.

Conséquences à long terme
Si la reconfiguration du jet-stream polaire devenait permanente, tempêtes, sécheresses et autres événements climatiques extrêmes deviendraient dans l'hémisphère Nord la norme plutôt que l'exception.

POURQUOI LE JET-STREAM ONDULE-T-IL DAVANTAGE ? DEUX THEORIES

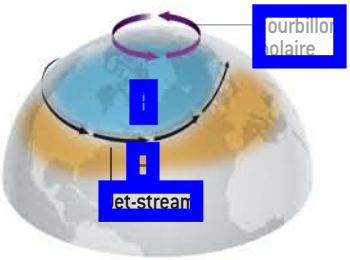
1 Les téléconnexions atmosphériques

Les téléconnexions, c'est-à-dire les modes de circulation de l'air dans l'atmosphère, peuvent changer, ce qui altère la trajectoire du jet-stream. Deux téléconnexions auraient des effets notables sur le jet-stream polaire : l'ENSO et l'oscillation arctique.

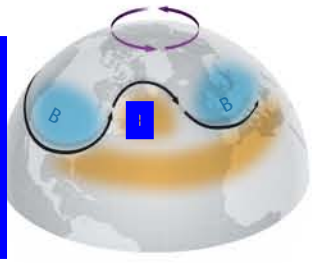


L'ENSO ou la téléconnexion El Niño-Oscillation australe
Cette oscillation de la pression atmosphérique tropicale a deux phases : El Niño, qui déplace vers l'Est l'eau plus chaude de l'océan Pacifique et décale le jet-stream vers le Sud ; La Niña, qui apporte de l'eau froide et décale le jet-stream vers le Nord. La forte amplitude récente de ces phases, liée à la structure du jet-stream, est peut-être liée au réchauffement climatique.

La trajectoire du jet-stream est rectiligne quand la différence de pression entre latitudes polaires et moyennes est grande, ce qui maintient l'air froid au pôle.



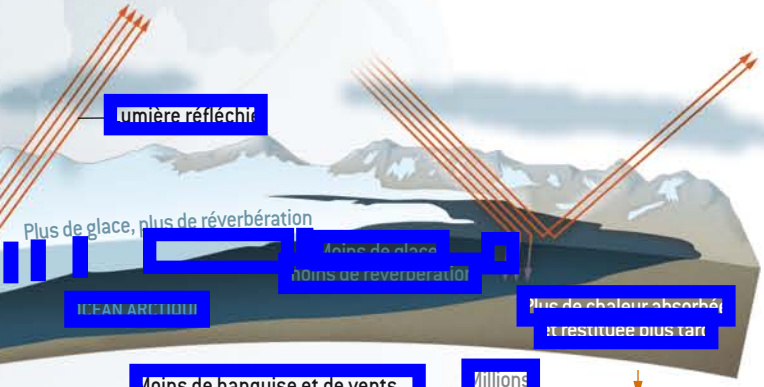
Le jet-stream décrit des méandres quand la différence de pression entre latitudes polaires et moyennes est faible, ce qui amène de l'air froid au Sud et de l'air chaud au Nord.



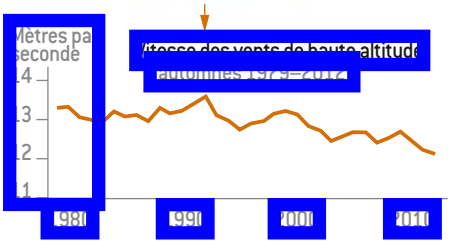
L'oscillation arctique
De semaine en semaine, la pression au niveau de la mer entre l'Arctique et les latitudes moyennes varie, ce qui fait évoluer le jet-stream entre les deux états décrits ci-dessus.

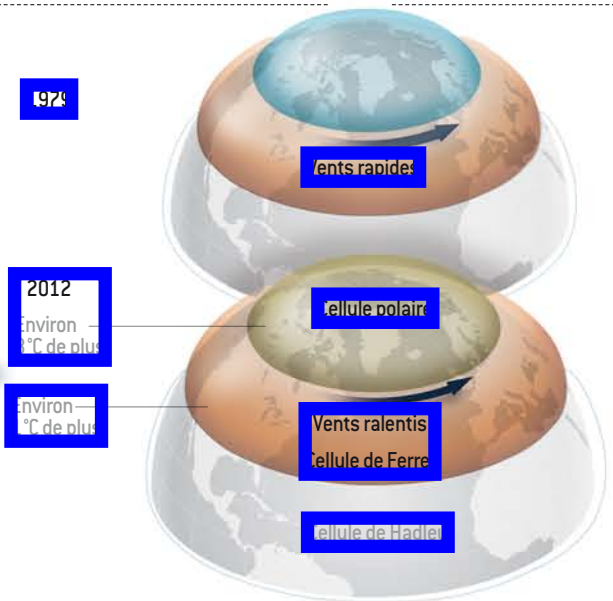
2 L'amplification arctique

Dans l'Arctique, l'air se réchauffe deux à trois fois plus vite que sous les latitudes moyennes, surtout à cause de la réduction de la banquise. La faible différence de température entre les latitudes polaires et moyennes *(à droite)* qui en résulte ralentit le jet-stream et amplifie ses ondulations.



Moins de banquise et de vents
Entre 1980 et 2010, la banquise arctique a perdu 40 % de sa superficie, tandis que les vents de haute altitude traversant l'Amérique du nord perdaient 14 % de leur vitesse. Le ralentissement est associé à l'apparition de grandes incurvations dans le jet-stream.





Sur le front de la lutte contre le dérèglement climatique

Fin 2014, à Lima au Pérou, les négociations de la COP20 (la 20e Conférence des Parties signataires de la Convention Climat) ont préparé la signature [illegible] qui se tiendra en décembre 2015 à Paris.

Cet accord devient urgent, car si le jet-stream est bien sur le point d'entrer dans un régime nouveau, cela ne présage rien de bon. Dans un article publié en août 2014, James Screen, de l'Université d'Exeter en Angleterre, et un collègue en identifient les effets potentiels. Si les oscillations du jet-stream « sont amplifiées en réponse au changement climatique anthropique, comme il a été proposé », écrivent-ils, « nos résultats suggèrent que cela augmentera surtout la fréquence des vagues de chaleur dans l'Ouest de l'Amérique du Nord et en Asie centrale, des vagues de froid dans l'Est de l'Amérique du Nord ainsi que des sécheresses dans le centre de l'Amérique du Nord, en Europe et en Asie centrale, ou encore des précipitations massives en Asie occidentale. »

Ce nouveau régime signifierait plus de sécheresses estivales massives dans le Midwest. Des séries de tempêtes de neige hivernales, telle le *Snowmaged-don* (le « monstre de neige ») qui a isolé Washington en 2010, rapporteront souvent l'Amérique du Nord. Étant donné l'augmentation du prix des denrées alimentaires due aux sécheresses à répétition qui affecteront le centre de l'Amérique du Nord, l'Europe et l'Asie centrale, le nouveau régime du jet-stream signifierait aussi des famines dans le monde entier.

Comme l'illustre l'article de Jeff Masters, de plus en plus de climatologues pensent que le réchauffement climatique est à l'origine de l'évolution du jet-stream. Dès lors, quels sont les espoirs de limiter les dégâts ?

Il en existe, puisque le dialogue international sur les moyens de limiter la hausse de la température terrestre moyenne s'améliore. Tout d'abord, plus aucun pays n'affirme qu'il est trop tôt pour parvenir à un accord, a-t-on constaté pendant la COP20. Les signes encourageants se multiplient par ailleurs. Ainsi, l'Union européenne a fait savoir qu'elle veut réduire de 40 % ses émissions de gaz à effet de serre avant 2030. Par ailleurs, les deux plus grands pollueurs de la planète se sont pour la première fois accordés sur des objectifs de réduction de leurs émissions. Tandis que les États-Unis veulent les réduire de 26 à 28 % avant 2030, la Chine s'est engagée... à commencer à les faire décroître la même année.

Le ministère français des Affaires étrangères annonce que le but de la COP21 est de parvenir à un « accord ambitieux et contraignant face au défi du dérèglement climatique qui s'appliquerait à tous les pays ». La France, qui accueillera les participants sur le site de Paris-Le Bourget, cherchera à y établir un « agenda de solutions », c'est-à-dire une batterie d'initiatives complémentaires suffisante pour maintenir le réchauffement planétaire à moins de 2 °C.

François Savatier
Pour la Science

de façon significative la forme et la position du jet-stream dans l'hémisphère Nord. En effet, l'une des principales causes de l'amplification arctique est la disparition de la banquise. La fonte des glaces et un régime de vents défavorables ont fait disparaître 49 % de la superficie moyenne de la banquise depuis 1979, ce qui correspond à six fois la surface de la France ! Or, puisqu'elle est de couleur foncée, la mer absorbe davantage le rayonnement solaire que la banquise. Moins de banquise signifie donc un océan et une atmosphère plus chauds, ce qui signifie moins de banquise, donc plus de réchauffement, etc.

Après avoir emmagasiné de la chaleur pendant le printemps et l'été, l'eau marine la libère en automne et en hiver, ce qui exerce une grande influence sur l'état de l'atmosphère arctique. L'inhabituelle amplification arctique résulte aussi de la diminution de la couverture neigeuse, dont témoignent les trois jours d'avance que prend le printemps chaque décennie récente. En effet, la disparition de la neige expose le sol arctique, qui, étant foncé, absorbe mieux le rayonnement solaire que la neige. Résultat : il sèche, d'où une saison chaude plus précoce dans les régions arctiques continentales.

L'amplification arctique due à la disparition de surfaces importantes de banquise et de couverture neigeuse a considérablement diminué la différence de température entre les latitudes hautes et moyennes, ce qui réduit l'énergie transférée entre ces régions. De fait, depuis 1979, la baisse de l'écart de température entre les latitudes polaires et moyennes s'est accompagnée d'une réduction automnale de 14 % de la vitesse des vents d'altitude au-dessus de l'Amérique et de l'Atlantique nord.

Le courant-jet ralenti qui en résulte parcourt de larges méandres sinueux, et Jennifer Francis a montré que leur amplitude a augmenté depuis 2000. En conséquence, d'énormes masses d'air chaud ou d'air froid parviennent plus loin que d'habitude, les premières vers le Nord et les secondes vers le Sud. Les modèles physiques montrent que le ralentissement du jet-stream freine la progression des ondes de Rossby vers l'Est, voire l'interrompt, ce qui fait perdurer des conditions climatiques anormales.

Parmi les spécialistes de météorologie, le comportement fantasque du jet-stream a soulevé une… tempête. Si de nombreux experts s'accordent sur le fait que le jet-stream change, beaucoup notent que l'amplification arctique n'est réellement marquée que depuis 15 ans, une période trop brève pour conclure.

Pas le bon bilan énergétique ?

D'autres doutent que l'amplification arctique puisse expliquer le comportement erratique du jet-stream pour des raisons énergétiques. L'énergie contenue dans l'air déplacé par le jet-stream étant énorme, la quantité de chaleur nécessaire pour faire évoluer la forme du grand courant aérien est considérable. Or Kevin Trenberth, du Centre national américain de recherche atmosphérique, a fait observer que la quantité de chaleur que l'amplification arctique a apportée à la région polaire est dix fois inférieure à celle accompagnant les évolutions naturelles du jet-stream induites par l'ENSO (El Niño-oscillation australe). Avec des collègues, il a montré que dans l'océan Pacifique tropical, les transferts naturels d'énergie visibles ces récentes années sont

dus à une téléconnexion nommée oscillation décennale du Pacifique. Selon ces chercheurs, les évolutions de cette téléconnexion au cours des dix dernières années traduiraient la façon dont le changement climatique modifie les transferts d'énergie dans le Pacifique tropical.

Aussi n'est-il pas étonnant que Kevin Trenberth ait fait partie d'un groupe de cinq éminents climatologues qui, en février 2014, a critiqué le travail de Jennifer Francis dans la revue *Science*. Pour ces cinq chercheurs, la thèse d'un lien entre réchauffement de l'Arctique et l'ondulation excessive du jet-stream « mérite qu'on y prête attention ». Toutefois, écrivent-ils aussi, les « arguments théoriques qui la sous-tendent ne sont pas irréfutables ».

Pénuries et famines en perspective ?

D'autres chercheurs doutent carrément de l'amplification des oscillations du jet-stream. Après les avoir étudiées en appliquant une définition différente de celle de Jennifer Francis, ils trouvent peu de différences statistiques dans les amplitudes des méandres du jet-stream ces dernières années et avant… Pour sa part, Dim Coumou, de l'Institut de recherche sur les effets du changement climatique à Potsdam, avance avec des collègues que la réduction de l'écart de température entre les latitudes polaires et moyennes suffit sans doute à amplifier les méandres du jet-stream, voire leurs blocages, en été du moins.

Les chercheurs peuvent polémiquer, mais la météorologie parle : les événements météorologiques les plus destructeurs de toute l'histoire des États-Unis, tels les 148 tornades qui ont frappé le Midwest en 1974, les sécheresses et les tempêtes de poussière des années 1930, la grande inondation du Mississippi de 1927 – ont tous été égalés ou dépassés entre 2011 et 2012 seulement… La planète se réchauffant, les températures de plus en plus élevées qui nous attendent ne pourront qu'induire la pénétration de vagues de chaleur dans les crêtes dessinées par le jet-stream. Si les théories avancées par Jennifer Francis et ses collègues sont correctes, aucun retour vers notre ancien climat ne sera possible, sauf à trouver un moyen de reproduire de la banquise. Par ailleurs, aucun climatologue ne croit en un rétablissement de la banquise sur le long terme, puisque la concentration atmosphérique du dioxyde de carbone continue d'augmenter d'environ 0,5 % par an.

Parmi tous les événements climatiques catastrophiques que subit l'humanité, les pires sont les sécheresses, car elles affectent nos ressources alimentaires. Ainsi, si une zone de haute pression associée à un méandre de forte amplitude du jet-stream devait stationner tout un été au-dessus des greniers à blé de la Russie et des États-Unis, les pluies indispensables à ces cultures n'arriveraient pas. Les mauvaises récoltes qui s'ensuivraient entraîneraient alors une forte hausse des prix des denrées alimentaires, voire des famines.

C'est ce qui s'est produit en 2010, lorsqu'une zone de haute pression s'est installée durablement au-dessus de la Russie. Les dépressions qui apportent normalement les pluies estivales en Russie ont été déviées vers le Pakistan, où elles ont causé des inondations catastrophiques. Si la sécheresse qu'ont alors endurée les grandes plaines russes est la pire catastrophe naturelle jamais endurée par la Russie, elle a aussi eu des conséquences ailleurs : comme le pays avait interrompu ses exportations, les cours du blé ont grimpé sur les marchés mondiaux et contribué à déclencher les révoltes des « printemps arabes » de 2011.

Pour le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC), nous devons agir vite, afin de maintenir le réchauffement prévisible sous la barrière des deux degrés Celsius (*voir l'encadré page précédente*). Le GIEC préconise pour cette raison le triplement avant 2050 des productions d'énergie sans émission de gaz à effet de serre, à commencer par les productions d'électricité éolienne, solaire et nucléaire. Sans cela, nous ne parviendrons pas à faire chuter les émissions de gaz à effet de serre de 40 à 70 % par rapport aux niveaux de 2010. Le GIEC assure que ce changement pourrait être réalisé sans réduire la croissance économique mondiale de plus de 0,06 % par an. En revanche, si nous attendons jusqu'à 2030, il sera bien plus difficile d'agir. L'année 2030 est justement celle où, d'après les projections, la banquise estivale aura complètement disparu… ■

2030

L'année où, d'après les projections, la banquise estivale aura complètement disparu.

BIBLIOGRAPHIE

K. Thomas *et al.*, **Linkages between Arctic Warming and Mid-Latitude Weather Patterns : Summary of a Workshop**, National Academies Press, 2014 [téléchargement gratuit sur www.nap.edu].

Le site de prévisions météorologiques de l'auteur, en français : http://french.wunderground.com

UN HÉRITAGE d'un nouveau genre

Michael K. Skinner

Des polluants ou un stress peuvent altérer l'expression des gènes sans modifier les séquences génétiques. Certaines de ces anomalies – et les maladies associées – se transmettraient aux générations suivantes

Lorsque mes enfants sont nés, il y a environ 30 ans, je savais qu'à peu près la moitié de leur ADN était un héritage du mien. À l'époque, on pensait qu'il n'existait qu'une seule voie de transmission des informations biologiques héritables des parents aux enfants, du moins chez les humains et autres mammifères : le transfert de l'ADN du spermatozoïde et de l'ovule à l'embryon.

Bien sûr, on savait que l'ADN n'est pas tout. Si de nombreux traits y sont inscrits sous la forme de gènes codants – des séquences qui déterminent la forme et la fonction des protéines –, ce que nous absorbons compte aussi. Les conditions de vie – l'alimentation, la pollution, le stress – influent sur le fonctionnement des gènes. Par exemple, on invoque souvent les facteurs sociaux et environnementaux pour expliquer pourquoi de vrais jumeaux souffrent parfois de maladies différentes, malgré un patrimoine génétique très similaire.

Ce que l'on ignorait en revanche, c'est qu'on lègue à ses descendants bien plus qu'un code d'ADN. Nos enfants, mais aussi leurs enfants et petits-enfants, pourraient hériter d'une information dite épigénétique. Comme l'information génétique portée par l'ADN, l'information épigénétique est contenue dans les chromosomes et régule le fonctionnement des cellules. Mais il ne s'agit pas de séquences d'ADN et cette information peut être sensible à l'environnement. Ses vecteurs sont divers, incluant de petites molécules biochimiques qui se fixent sur l'ADN et les protéines composant les chromosomes.

Les recherches menées dans notre laboratoire et d'autres, principalement sur des rats et des souris, ont révélé que certains polluants – notamment des produits chimiques agricoles, le kérosène et même certains plastiques – sont en mesure d'entraîner des aberrations épigénétiques. Et ces anomalies peuvent elles-mêmes se traduire en maladies et problèmes de fertilité, sans que la séquence d'ADN soit modifiée. Plus étonnant, lorsque de telles « épimutations » surviennent dans les cellules qui deviendront des ovules ou des spermatozoïdes, elles peuvent devenir permanentes et être transmises aux générations suivantes – avec leurs éventuels risques pour la santé.

Des études sur le long terme suggèrent que les épimutations se transmettraient de génération en génération aussi chez les

L'ESSENTIEL

- L'expression des gènes est régulée par les facteurs dits épigénétiques – des marques biochimiques sur les chromosomes qui laissent inchangée la séquence d'ADN.
- La plupart de ces marques sont réinitialisées peu après la fécondation.
- L'environnement (polluants, stress, alimentation, etc.) peut introduire des erreurs épigénétiques et modifier ainsi le comportement des cellules.
- Certaines de ces erreurs pourraient être transmises aux descendants

humains. Si tel est bien le cas, les implications pour la santé publique seraient considérables. La forte progression de l'obésité, du diabète et d'autres maladies chez les enfants du *baby-boom* et les plus jeunes générations pourrait être liée, en partie, à l'exposition de leurs parents et de leurs grands-parents à des polluants tels que la dioxine et le DDT, un insecticide abondamment utilisé dans les années 1950-1960.

La matière noire du génome

Les effets épigénétiques sont connus depuis quelque temps, mais l'étendue de leur rôle n'est apparue que récemment. Il y a plusieurs dizaines d'années, des biologistes ont remarqué que des groupes méthyle (CH_3) sont attachés à l'ADN en de nombreuses positions *(voir l'encadré pages 68-69)*. Chez les mammifères, dont l'homme, cette modification se rencontre souvent aux endroits où la lettre C du code génétique (la cytosine) précède la lettre G (la guanine) – une configuration que l'on retrouve environ 28 millions de fois dans l'ADN.

Les scientifiques ont tout d'abord cru que la fonction principale de cette méthylation de l'ADN était de réprimer les transposons – des fragments d'ADN capables de se déplacer dans le génome, provoquant parfois des maladies. Aujourd'hui, nous savons que la méthylation participe aussi à la régulation de l'activité des gènes et qu'elle est perturbée dans de nombreuses maladies, dont le cancers.

Dans les années 1990, des biologistes ont mis en évidence d'autres types de marques épigénétiques et leur fonctionnement. Ils ont découvert que des groupes méthyle, acétyle ($COCH_3$) et d'autres modifications biochimiques marquent des groupes de protéines nommées histones. Dans un chromosome, la molécule d'ADN s'enroule autour de chaque groupe d'histones, formant comme un collier de perles. Les marques épigénétiques contrôlent le degré de resserrement des boucles d'ADN autour des perles et l'écart entre chaque perle, ce qui active ou inhibe des ensembles entiers de gènes. Par exemple, les gènes situés dans les endroits très compacts sont mis sous silence, car inaccessibles à la machinerie qui lit les gènes.

Depuis, on a identifié d'autres acteurs épigénétiques tels que la structure tridimensionnelle changeante de l'ADN

ou des ARN dits non codants. Les ARN sont des molécules produites par la cellule lors de la lecture du code ADN. Nombre d'entre eux sont des intermédiaires dans la fabrication des protéines. Mais parmi les ARN non codants, certains modulent les marques épigénétiques de l'ADN et des histones.

Tous ces acteurs épigénétiques régulent l'activité des gènes de façon complexe, sans changement de la séquence d'ADN. L'interaction des gènes et de l'épigénome, l'ensemble des marques épigénétiques, est dynamique et reste encore mystérieuse. On sait que chaque fois qu'une cellule se divise, les marques épigénétiques de ses chromosomes sont copiées sur ceux des cellules filles. Les événements épigénétiques survenus tôt dans la vie peuvent donc altérer le comportement des cellules à long terme.

De plus, alors que les cellules sont équipées d'une machinerie qui protège la séquence d'ADN des altérations, elles corrigent la carte des marques épigénétiques au cours du développement de l'individu. Ces changements contribuent à déterminer la spécialisation des cellules, c'est-à-dire leur acquisition des caractéristiques de cellules de la peau ou de neurones, par exemple : de légères modulations de l'information épigénétique suffisent à changer la carte des gènes actifs dans tout l'organisme. De même, les substances chimiques dangereuses, les carences nutritives et autres types de stress pourraient entraîner l'apparition ou la disparition de marques épigénétiques, et modifier l'activité des gènes.

Aujourd'hui, le rôle crucial des marques épigénétiques dans le développement, le vieillissement et même le cancer ne fait aucun doute. Mais les biologistes débattent sur la portée de leurs effets : des épimutations anormales peuvent-elles se transmettre sur plusieurs générations de mammifères ? Un nombre croissant d'études, dont celles que nous avons menées, m'en ont convaincu.

Un héritage accidentel

Mon premier contact avec cette question a été fortuit. Il y a environ 13 ans, avec Andrea Cupp et d'autres collègues de l'Université d'État de Washington, nous étudiions les effets, sur la reproduction des rats, de deux substances chimiques employées dans l'agriculture : le méthoxychlore, un pesticide, et la vinclozoline, un fongicide. Ces molécules sont des perturbateurs endocriniens : elles interfèrent avec les signaux hormonaux qui orchestrent la formation des organes de reproduction et leur fonctionnement. Nous les avions injectées à des rates au cours de leur deuxième semaine de gestation – au moment où les gonades de l'embryon se développent. Presque tous les descendants mâles nés de ces mères ont présenté des testicules anormaux, fabriquant des spermatozoïdes médiocres en qualité et en quantité.

Nous ne pensions alors pas à un effet épigénétique, et encore moins à une transmission de ces anomalies par les mères exposées. Aussi n'avions-nous pas prévu de les élever et d'étudier leur descendance. Or un jour, par erreur, Andrea Cupp accoupla des rats mâles et femelles issus de cette expérience (sans lien de parenté).

Le résultat fut étonnant : plus de 90 % des mâles de ces portées arboraient les mêmes anomalies des testicules que leur père, alors que leurs parents étaient des embryons de la taille d'une tête d'épingle lorsque leurs propres mères avaient été exposées aux substances chimiques.

Cela nous surprit. De nombreuses études toxicologiques avaient recherché si des substances répandues dans l'environnement, telles que le méthoxychlore ou la vinclozoline, provoquaient des mutations de l'ADN. En vain. Ce que confirmait notre étude. De plus, la génétique classique ne pouvait expliquer l'apparition d'un nouveau trait chez 90 % de rats issus de différentes familles.

Cependant, une autre explication était envisageable : l'exposition aux substances chimiques avait eu lieu alors que l'embryon contenait déjà des cellules germinales primordiales – des cellules qui se spécialiseront en spermatozoïdes ou en ovules. La substance chimique aurait pu influencer directement ces cellules, l'effet persister dans les spermatozoïdes ou les ovules qu'elles avaient donnés et, par conséquent, se retrouver dans les fruits de leur fécondation : les petits de la génération suivante, soit la troisième génération depuis les mères exposées. Si tel était le cas, alors la brève exposition aux substances chimiques aurait directement entraîné les anomalies des testicules des petits rats de la troisième génération, mais les générations suivantes devraient être normales.

Pour le vérifier, nous avons élevé une quatrième génération de rats, puis une cinquième, en accouplant à chaque fois des descendants des rats exposés à l'origine, afin d'éviter la dilution du trait étudié. Résultat : les mâles des quatrième et cinquième générations souffraient des mêmes

L'AUTEUR

Michael SKINNER est professeur de biologie à l'Université d'État de Washington, aux États-Unis.

GLOSSAIRE

Épimutation : Modification chimique d'un chromosome ou des protéines qui le structurent, sans altération de la séquence d'ADN. Des marques dites épigénétiques – un groupe méthyle par exemple – sont ajoutées ou ôtées, ce qui module l'expression de gènes.

Épigénome : Ensemble des épimutations.

Gène soumis à empreinte parentale : Chez un individu donné, un tel gène porte une marque épigénétique qui atteste qu'il provient soit de la mère de l'individu, soit de son père. Les deux copies du gène sont présentes dans le génome de l'individu, mais grâce à cette marque, seule l'une des deux s'exprimera.

Cellules germinales primordiales : Cellules de l'embryon qui se spécialiseront en spermatozoïdes ou en ovules.

problèmes que leurs ascendants. Et tous ces changements résultaient d'une exposition brève (mais à des doses bien plus élevées) à des produits utilisés dans l'agriculture pendant des décennies.

Après plusieurs années d'expériences qui ont confirmé ces résultats, nous avons formulé l'hypothèse suivante : l'exposition aux substances avait déclenché l'apparition d'épimutations pathologiques pour le développement des testicules. Au moment de la fécondation, ces épimutations passeraient du spermatozoïde à l'embryon, puis persisterait dans ses cellules germinales primordiales, et ainsi de suite de génération en génération. En accord avec cette hypothèse, nos études préliminaires suggéraient des défauts de méthylation de l'ADN dans les spermatozoïdes des descendants des mâles exposés au fongicide.

Un effet jusqu'à la 5e génération

La publication de ces résultats, en 2005, a déclenché une tempête. Notamment, diverses équipes, issues de sociétés commercialisant la vinclozoline ou indépendantes, ont signalé qu'elles n'arrivaient pas à reproduire certains résultats. Ces incompatibilités pourraient être liées à des protocoles expérimentaux différents : administration par ingestion ou par injection, utilisation d'autres lignées de rats, mise en accouplement des mâles anormaux avec des femelles issues d'une lignée non exposée. Néanmoins, nous avons accumulé d'autres preuves suggérant que les épimutations pourraient persister sur plusieurs générations.

Notamment, nous avons mis en évidence des anomalies de méthylation de l'ADN dans les spermatozoïdes, les testicules et les ovaires de la quatrième génération issue des rats exposés au fongicide. L'activité des gènes dans leurs cellules germinales primordiales est aussi perturbée. Ces descendants ont aussi tendance à grossir et à être sujets au stress ; ils sélectionnent même leurs partenaires différemment.

Dans le même temps, la liste des agents polluants et stressants produisant des effets transgénérationnels s'est allongée. Plusieurs équipes ont constaté une transmission de caractères acquis chez un grand nombre d'espèces, dont les plantes, mouches, vers, poissons, rongeurs et porcs.

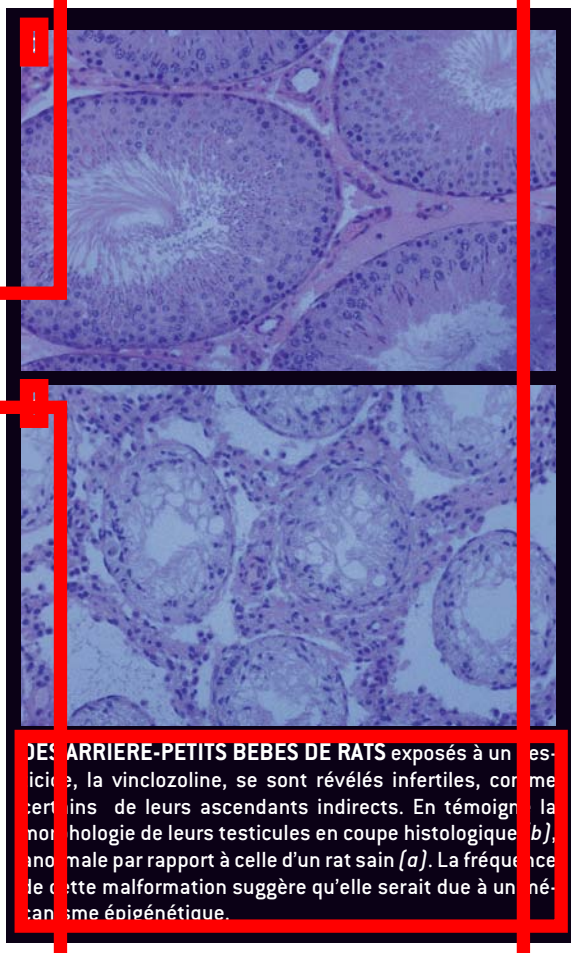
En 2012, nous avons montré que l'exposition de rates gravides (en période de gestation) à des polluants tels que la dioxine, le kérosène, les insecticides ou un mélange de bisphénol A et de phtalates – des composants des récipients alimentaires plastiques ou des plombages dentaires – déclenche des troubles persistant chez les rats de la quatrième génération : anomalies de la puberté, obésité, maladies des ovaires, des reins et de la prostate... Dans leurs spermatozoïdes, les profils de méthylation de l'ADN comptent des centaines d'anomalies spécifiques de l'agent auquel leurs ancêtres ont été exposés. De plus, les effets observés ne suivent pas les profils classiques de transmission génétique, ce qui suggère que des épimutations, et non des mutations génétiques, sont la cause de ces troubles.

Dans une expérience similaire chez la souris, Kaylon Bruner-Tran et Kevin Osteen, de l'Université Vanderbilt aux États-Unis, ont constaté qu'environ la moitié des femelles nées de souris exposées à de la dioxine étaient stériles. Et nombre de celles qui ne l'étaient pas ont mis bas prématurément. Ces problèmes ont persisté au moins sur deux autres générations.

Les doses utilisées pour ces études sont bien plus importantes que celles auxquelles l'homme ou l'animal sont exposés dans un environnement même fortement contaminé. Cependant, une étude de Jennifer Wolstenholme, de l'Université de Virginie, suggère que des effets transgénérationnels sont aussi possibles à des concentrations plus réalistes. Du bisphénol A a été introduit dans l'alimentation de souris à des doses reproduisant des concentrations dans le sang équivalentes à celles mesurées chez des femmes enceintes américaines. Les descendants des souris exposées passaient moins de temps à explorer la cage et davantage à interagir avec leurs congénères, et ce, sur cinq générations. Selon les chercheurs, ce changement de comportement serait dû à une altération de la production de deux protéines clefs, l'ocytocine et la vasopressine. Ils ont aussi observé que les profils de méthylation de l'ADN étaient perturbés chez les descendants, mais le lien entre ces deux observations reste à prouver.

Existe-t-il des effets similaires chez l'homme ? Une étude en cours fait suite à la catastrophe de Seveso, en Italie : en 1976, l'explosion d'une usine chimique a exposé les habitants des environs, dont Seveso, à des taux de dioxine inédits. En suivant la concentration sanguine en dioxine de 1 000 femmes exposées et leur bilan de santé, les chercheurs ont établi, en 2010, une corrélation entre le degré d'exposition à la dioxine et la capacité à avoir des enfants. À chaque multiplication par dix du taux de dioxine, le temps moyen pour tomber enceinte augmente de 25 %, et le risque de stérilité est doublé.

En 2013, la même équipe a rapporté que les jeunes filles âgées de moins de 13 ans au moment des faits avaient deux fois plus de risques de développer à l'âge adulte un syndrome métabolique – une conjonction de diverses caractéristiques (forte pression artérielle, concentration élevée de glucose dans le sang…) prédisposant au diabète



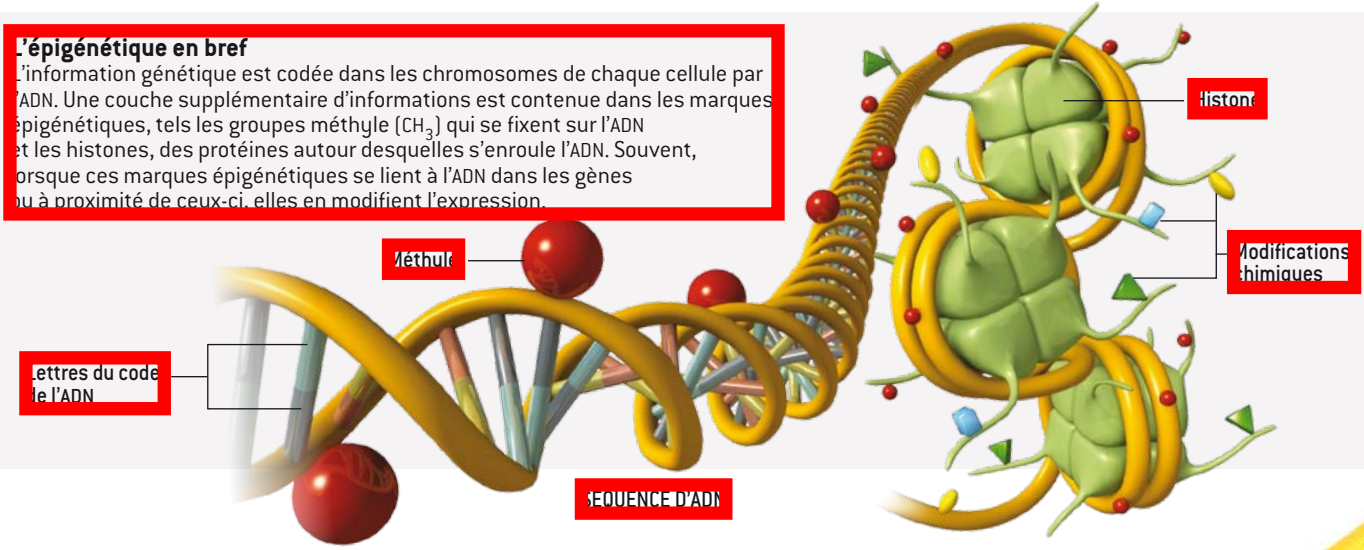
DES ARRIERE-PETITS BEBES DE RATS exposés à un [illegible]e, la vinclozoline, se sont révélés infertiles, comme certains de leurs ascendants indirects. En témoignent la morphologie de leurs testicules en coupe histologique *(b)*, anormale par rapport à celle d'un rat sain *(a)*. La fréquence de cette malformation suggère qu'elle serait due à un mécanisme épigénétique.

UN HERITAGE HORS DES GENES

Des biologistes ont découvert que les événements auxquels sont confrontés les animaux et les plantes au cours de leur vie – une exposition à certains polluants ou au stress, par exemple – peuvent influer sur la santé de leurs descendants sans causer de mutations dans leur génome. De telles expositions peuvent avoir des conséquences sur les deux premières générations de descendants en agissant sur les spermatozoïdes, les ovules et les autres cellules de la reproduction. On parle d'effet direct intergénérationnel. Les générations suivantes seraient parfois aussi touchées par le biais d'étiquettes chimiques qui se lient à l'ADN dans les cellules. La transmission est alors dite épigénétique transgénérationnelle.

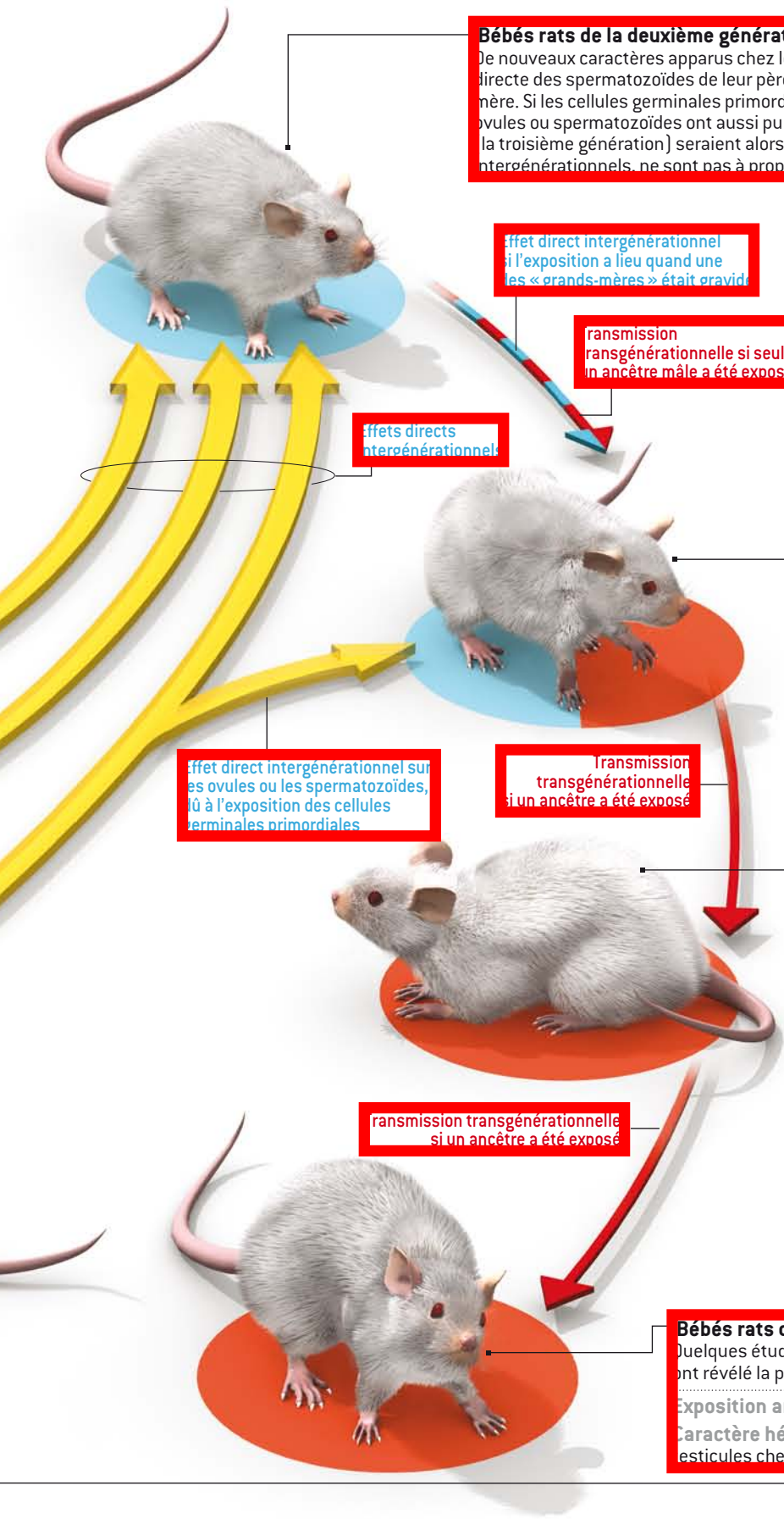
L'épigénétique en bref

L'information génétique est codée dans les chromosomes de chaque cellule par l'ADN. Une couche supplémentaire d'informations est contenue dans les marques épigénétiques, tels les groupes méthyle (CH_3) qui se fixent sur l'ADN et les histones, des protéines autour desquelles s'enroule l'ADN. Souvent, lorsque ces marques épigénétiques se lient à l'ADN dans les gènes ou à proximité de ceux-ci, elles en modifient l'expression.



Comment des caractères épigénétiques peuvent persister sur plusieurs générations

L'exposition à un polluant ou à un stress peut faire apparaître des caractères non transmissibles sur deux générations si elle concerne un mâle et son spermatozoïde, ou sur trois générations s'il s'agit d'une femelle gravide et si l'exposition survient à un certain stade de la gestation *(en bleu page ci-contre)*. Pour que ce caractère épigénétique soit transmis aux générations suivantes *(en rouge)*, le marquage altéré doit résister aux deux vagues de reprogrammation qui, après la conception, « réinitialise » la plupart des étiquettes épigénétiques des chromosomes *(ci-dessous)*. Des études sur des rongeurs suggèrent qu'une telle transmission transgénérationnelle existe.



Bébés rats de la deuxième génération

De nouveaux caractères apparus chez les bébés rats pourraient être dus à l'exposition directe des spermatozoïdes de leur père, ou de leur propre fœtus dans le ventre de leur mère. Si les cellules germinales primordiales des bébés rats ont été exposées, alors leurs ovules ou spermatozoïdes ont aussi pu être contaminés directement. Leurs futurs petits (la troisième génération) seraient alors eux aussi contaminés. De tels effets directs, dits intergénérationnels, ne sont pas à proprement parler transmis d'une génération à l'autre.

Effet direct intergénérationnel si l'exposition a lieu quand une des « grands-mères » était gravide

Transmission transgénérationnelle si seul un ancêtre mâle a été exposé

Effets directs intergénérationnels

Effet direct intergénérationnel sur les ovules ou les spermatozoïdes, dû à l'exposition des cellules germinales primordiales

Transmission transgénérationnelle si un ancêtre a été exposé

Transmission transgénérationnelle si un ancêtre a été exposé

Bébés rats de la troisième génération

Une transmission transgénérationnelle peut survenir à la troisième génération si l'un des grands-parents mâles a été exposé. À ce jour, des études ont recensé ce phénomène pour divers types d'exposition.

Exposition ancestrale : Conditionnement à la peur en cas d'odeur inconnue

Caractère hérité : Réaction de sursaut amplifiée en présence de l'odeur

Exposition ancestrale : Régime alimentaire gras et molécule provoquant un prédiabète

Caractère hérité : Intolérance au glucose et résistance à l'insuline

Bébés rats de la quatrième génération

Dans la plupart des études sur la transmission transgénérationnelle, les chercheurs ont exposé des femelles gravides à un composé toxique ou à un stress. Ils doivent ensuite élever au moins quatre générations de rats pour montrer que les nouveaux caractères obtenus sont transmissibles.

Exposition ancestrale : Méthoxychlore ; vinclozoline

Caractère hérité : Spermatozoïdes moins nombreux et moins mobiles ; anxiété accrue chez les femelles

Exposition ancestrale : Dioxine

Caractère hérité : Faible taux de testostérone chez les mâles ; stérilité et mise bas prématurée chez les femelles

Exposition ancestrale : Bisphénol A

Caractère hérité : Faible taux de testostérone chez les mâles ; ovaires anormaux ou puberté précoce chez les femelles

Exposition ancestrale : Kérosène ; DDT

Caractère hérité : Taux d'obésité élevé ; ovaires polykystiques

Bébés rats de la cinquième génération

Quelques études poursuivies jusqu'à la cinquième génération ont révélé la persistance de certains effets

Exposition ancestrale : Vinclozoline ; DDT

Caractère hérité : Maladies de la prostate, des reins et des testicules chez les mâles ; maladie des ovaires chez les femelles

et aux maladies cardiaques. De plus, des anomalies de fonctionnement de la thyroïde ont été signalées chez nombre de petites-filles des femmes exposées.

Comme chez l'animal, les troubles recensés concernent la reproduction et le métabolisme, ce qui suggère que chez l'homme aussi, la dioxine favoriserait la survenue d'épimutations. Toutefois, il faudra attendre l'étude de la santé des enfants et petits-enfants des femmes exposées, et de leur profil de méthylation, pour le confirmer.

Une autre étude a été menée en Suède, à partir de données rassemblées sur 317 personnes nées en 1890, 1905 et 1920 à Överkalix, et sur leurs parents et grands-parents. Marcus Pembrey, de l'*University College* de Londres, Lars Olov Bygren, de l'Institut Karolinska de Stockholm, et leurs collègues ont comparé les informations sur le décès de ces personnes avec des estimations des vivres disponibles dans cette commune qui, au XIX^{e} siècle, a traversé plusieurs périodes où disettes et bonnes récoltes se sont succédé d'une année à l'autre. Il est apparu que les femmes dont la grand-mère paternelle avait connu, enfant, une telle alternance d'abondance et de privation, présentaient un risque plus élevé de mourir d'une maladie cardiovasculaire.

Curieusement, ce risque accru n'a pas été observé chez les hommes, ni chez les femmes dont la grand-mère maternelle ou les grands-pères avaient vécu un tel changement de régime. L'étrangeté de cette transmission suggère qu'elle pourrait être épigénétique. D'autres travaux sur les descendants d'une population hollandaise victime de la famine pendant la Seconde Guerre mondiale ont livré des résultats similaires.

Si l'idée que des épimutations dues à l'environnement puissent s'inscrire dans la lignée germinale laisse nombre de biologistes sceptiques, c'est parce qu'elle contredit un fait bien établi : à deux reprises durant le développement, la plupart des marques épigénétiques sont effacées de l'ADN, puis réécrites. Ces deux processus gommeraient ainsi toutes les épimutations acquises et limiteraient leur transmission à la génération suivante.

Les marques épigénétiques sont certes effacées, mais jusqu'à quel point ? La première vague de réinitialisation a lieu dans les jours qui suivent la fécondation. Les groupes méthyle sont retirés des chromosomes parentaux, ce qui confère aux cellules souches embryonnaires la possibilité de former tous les types cellulaires. Les étiquettes réapparaissent juste avant que l'embryon forme ses organes. Dans chaque type de cellules, au fil de leurs divisions et spécialisations, l'ADN se dote de divers profils de méthylation, selon leurs futures fonctions.

Or quelques gènes semblent protégés de cette première vague de reprogrammation épigénétique. On dit que ces gènes sont soumis à empreinte parentale, car les marques épigénétiques dont ils héritent des parents sont sauvegardées, ce qui garantit que seule la copie maternelle ou paternelle du gène sera utilisée pour fabriquer une protéine. Par exemple, chez mes enfants,

Comment cerner le spectre de l'épigénétique

Le fantôme de l'épigénétique hantant notre descendance sur plusieurs générations en conséquence de nos mauvaises habitudes est un grand fantasme. Sur quels fondements scientifiques s'appuie-t-il ?

Selon un nombre croissant d'études, l'exposition d'un individu, homme ou animal, à des conditions adverses – polluants, stress… – peut influencer la survenue de maladies dans sa descendance. Il s'agit là de cas potentiels de transmission intergénérationnelle, dont certains, tels ceux des études de Mickael Skinner, semblent concerner plusieurs générations. Quel en est le vecteur ?

Cela revient à s'interroger sur ce que les parents transmettent à leurs enfants : un patrimoine génétique, des facteurs épigénétiques, mais aussi une éducation culturelle. La combinaison de ces héritages influence les traits morphologiques, la susceptibilité aux maladies et les comportements. Déterminer la part de chacun est un défi, quasi inextricable chez l'homme, mais plus accessible dans les modèles animaux, à condition d'appliquer des protocoles adéquats.

Dans des populations naturelles, humaines ou animales, le matériel génétique est polymorphe : un gène peut exister sous plusieurs formes, ce qui joue sur son expression. L'exposition à une composante environnementale adverse est à même d'influencer la transmission de tel ou tel variant génique à la génération suivante et, ainsi, la susceptibilité aux maladies. La sélection en laboratoire de populations de souris et de rats sur plusieurs décennies a permis d'obtenir des lignées avec un fond génétique homogène : tous les individus portent les mêmes variants. Un premier niveau de bonne pratique expérimentale serait d'utiliser de telles lignées de longueurs. Malheureusement, la plupart des études reposent sur des modèles d'animaux au fond génétique hétérogène.

Ensuite, surtout aux doses élevées souvent utilisées, l'exposition à des agents chimiques pourrait produire des mutations génétiques à l'origine de la transmission des maladies observées. Seul un séquençage complet du génome exclurait cette composante génétique, ce qui n'a encore jamais été réalisé.

La question de l'héritage culturel se pose dans les cas de transmission de comportements anormaux. Par exemple, l'exposition de souris à une source de stress peut se répercuter par des comportements phobiques à la génération suivante non exposée. Souvent, une composante épigénétique est mise en avant, mais une transmission « culturelle » du stress (la mère stressée néglige ses petits qui deviennent eux-mêmes stressés) est tout aussi envisageable. Elle est de plus aisément testable : le recours à des protocoles de fécondation *in vitro* et de gestation par mères porteuses permet de s'affranchir de tout contact entre la mère stressée et ses petits. Malheureusement, cette procédure expérimentale est peu appliquée dans les études.

La démonstration d'une transmission épigénétique est donc possible : des efforts devront être faits pour améliorer les protocoles et s'affranchir des facteurs autres, génétiques ou culturels.

– Deborah Bourc'his et Edith Heard
Institut Curie / UMR3215 CNRS / U934 Inserm, Paris

e gène IGF2, qui code une hormone essentielle à la croissance, n'est actif que sur le chromosome que je leur ai transmis. La copie du gène provenant de leur mère est désactivée, notamment par l'action de la méthylation de l'ADN.

Une empreinte épigénétique acquise ?

La seconde vague de reprogrammation épigénétique survient plus tard, lorsque le fœtus d'un rat est gros comme une tête d'épingle et celui d'un être humain, de la taille d'un petit pois. C'est à ce moment-là que les cellules germinales primordiales commencent à apparaître au sein des gonades nouvellement formées de l'embryon – et au moment précis où nous avons administré la vinclozoline et d'autres polluants aux animaux de laboratoire. Chez les rats, cette période dure environ une semaine ; chez les humains, elle s'étend de la 6e à la 18e semaine de gestation.

Cette seconde vague est considérée comme totale : les marques de méthylation sont retirées même des gènes soumis à empreinte parentale. Cette perte de méthylation est suivie d'une reméthylation, dont la distribution diffère selon le sexe de l'individu : chez les femelles, les chromosomes contenus dans les futurs ovules acquièrent un profil de méthylation maternel, tandis que chez les mâles, les chromosomes contenus dans les futurs spermatozoïdes obtiennent un profil paternel.

Des agressions environnementales pourraient utiliser ce même mécanisme qui établit les étiquettes sur les gènes soumis à empreinte parentale et inscrire ainsi de nouvelles épimutations dans la lignée germinale. Si l'agression a lieu juste avant la vague de perte de méthylation, elle pourrait brouiller les données épigénétiques : des étiquettes qui auraient dû être effacées à jamais ne le seront pas, et d'autres qui auraient dû être épargnées ou rétablies pourraient être perdues pour toujours.

Si cette hypothèse se vérifiait, ses répercussions seraient considérables en médecine. Plusieurs équipes tentent de savoir si les obésogènes – des substances présentes dans l'environnement qui dérèglent le métabolisme et entraînent une prise de poids – augmentent le risque d'obésité sur plusieurs générations. En 2013, Bruce Blumberg et ses collègues, de l'Université de Californie à Irvine, ont montré que des souris gravides qui buvaient de l'eau contenant du tributylétain, utilisé pour empêcher les bernacles de s'accrocher à la coque des bateaux, mettaient bas des petits enclins à développer trop de cellules adipeuses et à avoir un foie gras. Ces modifications ont persisté dans les deux générations suivantes, ce qu'une épimutation expliquerait facilement.

Ainsi, bien que l'abondance de nourriture et les rythmes de vie modernes soient en grande partie responsables de l'augmentation en Occident de l'obésité, du diabète et d'autres maladies depuis une cinquantaine d'années, il est plausible que l'exposition de nos aïeuls à certaines substances ait pu accroître notre prédisposition à ces maladies.

La vision classique de l'évolution devrait aussi être élargie. L'évolution y est vue comme le fruit de mutations lentes et aléatoires, sélectionnées pour les avantages qu'elles offrent du point de vue de la reproduction ou de la survie de l'espèce. La transmission épigénétique expliquerait pourquoi de nouvelles espèces apparaissent plus souvent qu'on ne le pensait, compte tenu de la rareté des mutations génétiques avantageuses. Les variations épigénétiques sont mille fois plus fréquentes et pourraient contribuer à augmenter la diversité des individus au sein d'une population. La sélection naturelle agirait alors en ne gardant que les plus aptes – avec leur génome, leur épigénome et tout le reste.

EN JUILLET 1976, UN NUAGE DE DIOXINE s'est échappé d'un réacteur d'une usine chimique italienne et s'est répandu sur la plaine lombarde, notamment à Seveso. Un suivi des femmes exposées a révélé un risque accru pour divers problèmes de santé. Nombre de leurs petites-filles présentent des troubles de la thuroïde. La dioxine a-t-elle causé des épimutations ?

BIBLIOGRAPHIE

E. Heard et R. Martienssen, **Transgenerational epigenetics inheritance : myths and mechanisms**, *Cell*, vol. 157, pp. 95-109, 2014.

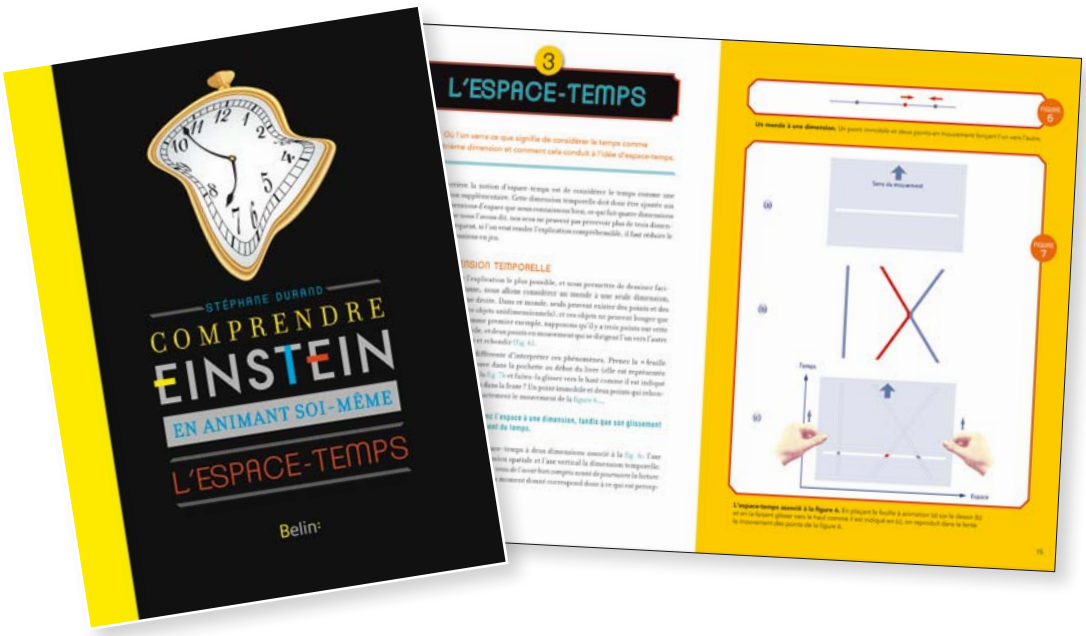
J. P. Barlow et M. S. Bartolomei, **Genomic imprinting in mammals**, *Cold Spring Harbor Persp. in Biol.*, vol. 6, a018382, 2014.

E. Daxinger et E. Whitelaw, **Understanding transgenerational epigenetic inheritance *via* the gametes in mammals**, *Nature Rev. Genetics*, vol. 13, pp. 153-162, 2012.

M. K. Skinner *et al.*, **Epigenetic transgenerational actions of environmental factors in disease etiology**, *Trends Endocrinol. Metab.*, vol. 21, pp. 214-222, 2010.

La sélection de livres POUR LA SCIENCE

Une sélection de livres ludiques et illustrés ou à petits prix pour tout comprendre de la chimie, animer soi-même l'espace-temps, retracer l'histoire des grandes découvertes scientifiques des années 60 ou encore devenir le meilleur ami des robots !



Comprendre Einstein en animant soi-même l'espace temps

Stéphane Durand

Réf. 70118355

Un ouvrage ludique pour devenir le maître de l'espace-temps à l'aide de schémas à animer soi-même. Voilà une manière très originale de trouver des réponses à des questions que l'on n'ose pas poser sur l'une des théories les plus ardues de la physique !

Éditions Belin 2014
16 pages - 15 € - 978-2-7011-9284-0

La science des sixties

Les avancées remarquables au temps des yéyés et de la Guerre froide

Dirigé par Olivier Néron de Surgy et Stéphane Tirard

Réf. 70118355

Un livre richement illustré qui porte un regard inédit sur l'implication des sciences dans le « bouillonnement culturel » des années 1960 et ses conséquences durables sur notre société.

Éditions Belin 2014
416 pages - 22,90 € - 978-2-7011-8355-8

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.

Drôle de chimie (nouvelle édition)

Pierre Laszlo

Réf.*74650882

Nourrir, vêtir, soigner, chauffer, transporter l'humanité, les 19 chapitres de ce livre nous permettent de faire la part des risques et des bienfaits d'une industrie trop peu connue. Cette édition est entièrement mise à jour.

Éditions Le Pommier 2015
400 pages - 10 € - 978-2-7465-0882-

La logique

Gille Dowek

Réf.* 74650878

Les outils et les méthodes de la logique, pour comprendre le sens du raisonnement.

Éditions Le Pommier 2015
128 pages - 7 € - 978-2-7465-0878-

De la Joconde aux tests ADN, jusqu'où ira la chimie ?

Stéphane Sarrade

Réf.*74650884

Grâce aux progrès de la chimie, il est aujourd'hui possible de quasiment tout mesurer. La chimie sera-t-elle le nouveau big brother ?

Éditions Le Pommier 2015
128 pages - 7,90 € - ISBN 978-2-7465-0884-

Le robot, meilleur ami de l'homme ?

Rodolphe Gelin

Réf.*74650883

Le robot est-il l'avenir de l'homme ? Un livre qui expose l'état actuel de cette technologie dont tout le monde semble savoir ce qu'elle sera dans plusieurs dizaines d'années sans vraiment avoir une idée de ce qu'elle est vraiment aujourd'hui....

Éditions Le Pommier 2015
128 pages - 7,90 € - 978-2-7465-0883-

Tous ces livres sont également disponibles en librairie.

BON DE COMMANDE

Groupe Pour la Science • 628 avenue du Grain d'Or • 41350 Vineu

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

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

J'indique mes coordonnées

Nom :

Prénom :

Adresse :

C.P. : Ville :

Pays : Tél. :

E-mail* :

Je choisis mon mode de règlement

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

❑ par carte bancaire

Numéro

Date d'expiration

Cryptogramme

Signature obligatoire

POUR LA SCIENCE Belin 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 ❑

DPL448 Offre

HISTOIRE DES SCIENCES

L'affaire du calendrier chinois

En 1664, des missionnaires jésuites en Chine furent condamnés à mort, pour avoir mal choisi la date des funérailles du fils de l'empereur. Les savants clercs prirent alors toute la mesure de l'importance des arts divinatoires chinois.

Pingui CHU

L'art de la divination a sans doute été l'un des problèmes les plus difficiles auxquels les jésuites ont été confrontés en Chine. Jamais ils n'avaient imaginé qu'un jour, ces « superstitions », comme ils les nommaient, anéantiraient presque leur mission. Or en 1664, Yang Guangxian, un érudit chinois auteur de plusieurs pamphlets contre la chrétienté, lance plusieurs accusations contre le père Adam Schall von Bell, un jésuite astronome alors en charge de l'élaboration du calendrier à la cour mandchoue, et ses associés chrétiens : tricherie, altération du calendrier, usurpation du droit de l'empereur…

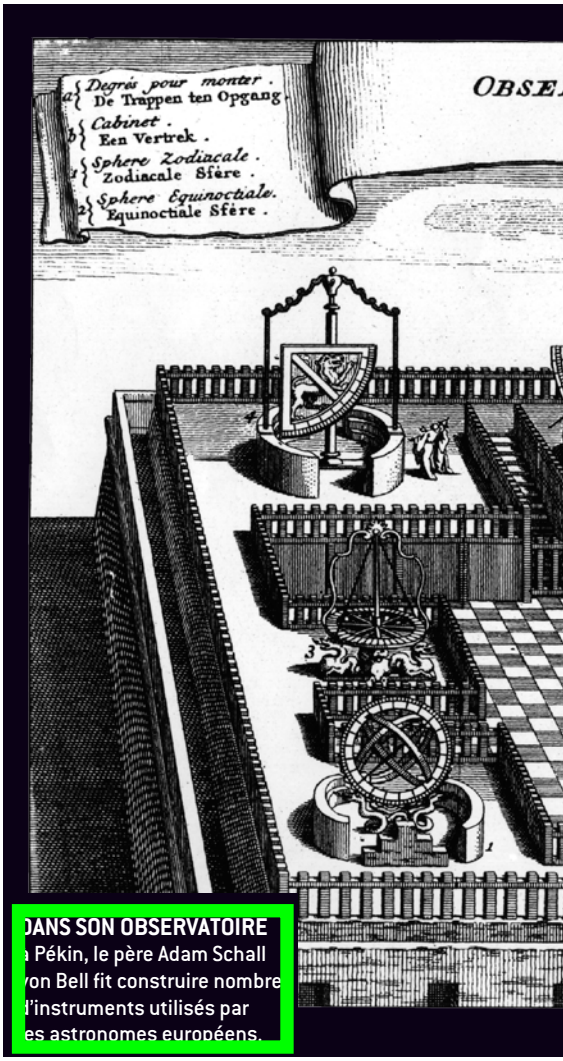
Un seul chef d'accusation est retenu : le mauvais calcul de la date et du lieu des funérailles du fils de l'empereur Shunzhi et de sa favorite, mort-né en 1658. La date choisie aurait précipité la mort de l'empereur, en 1661 à 22 ans. Schall et les autres jésuites de la cour sont condamnés à mort, ainsi que cinq astronomes chinois du Bureau de l'astronomie convertis au christianisme. D'autres jésuites en province sont déportés à Macao. Le futur de la mission est plus que compromis.

Le 16 avril 1665, cependant, au lendemain de la sentence, un puissant séisme dans le Nord de la Chine sauve les jésuites. Un tel signe ne peut signifier qu'une chose : le verdict était injuste. Les autorités lèvent les charges contre les jésuites et les libèrent (les cinq convertis chinois sont quant à eux exécutés, comme preuve de la souveraineté mandchoue sur la dynastie chinoise déchue).

Schall mourut en 1666, peu après sa libération. Alors que les jésuites avaient tout fait pour construire leur identité comme mandarins de la science, le destin leur avait joué un mauvais tour : ce qu'ils considéraient comme de la simple superstition avait causé à la fois leur condamnation et leur grâce. La superstition chinoise les avait presque expulsés de Chine, mais elle les avait aussi protégés d'une destruction totale. Dès lors, elle retint toute l'attention des missionnaires.

Une astronomie chinoise sur le déclin

Dans la Chine traditionnelle, l'astronomie n'avait rien d'un discours scientifique. Sa principale fonction était politico-religieuse. On l'utilisait pour établir des calendriers, prédire des événements célestes anormaux et pratiquer la divination. Astronomie, numérologie et astrologie formaient une entité indissociable. Les almanachs officiels de la Chine impériale tardive réservaient une large place aux dates favorables. Ils donnaient le sens de chaque jour et des suggestions de conduite au fil de l'année. Ainsi, l'empereur contrôlait le destin et la vie quotidienne des Chinois à travers un calendrier dont la précision, en retour, témoignait du mandat céleste qui lui était accordé. Celui qui produisait un calendrier



DANS SON OBSERVATOIRE à Pékin, le père Adam Schall von Bell fit construire nombre d'instruments utilisés par les astronomes européens.

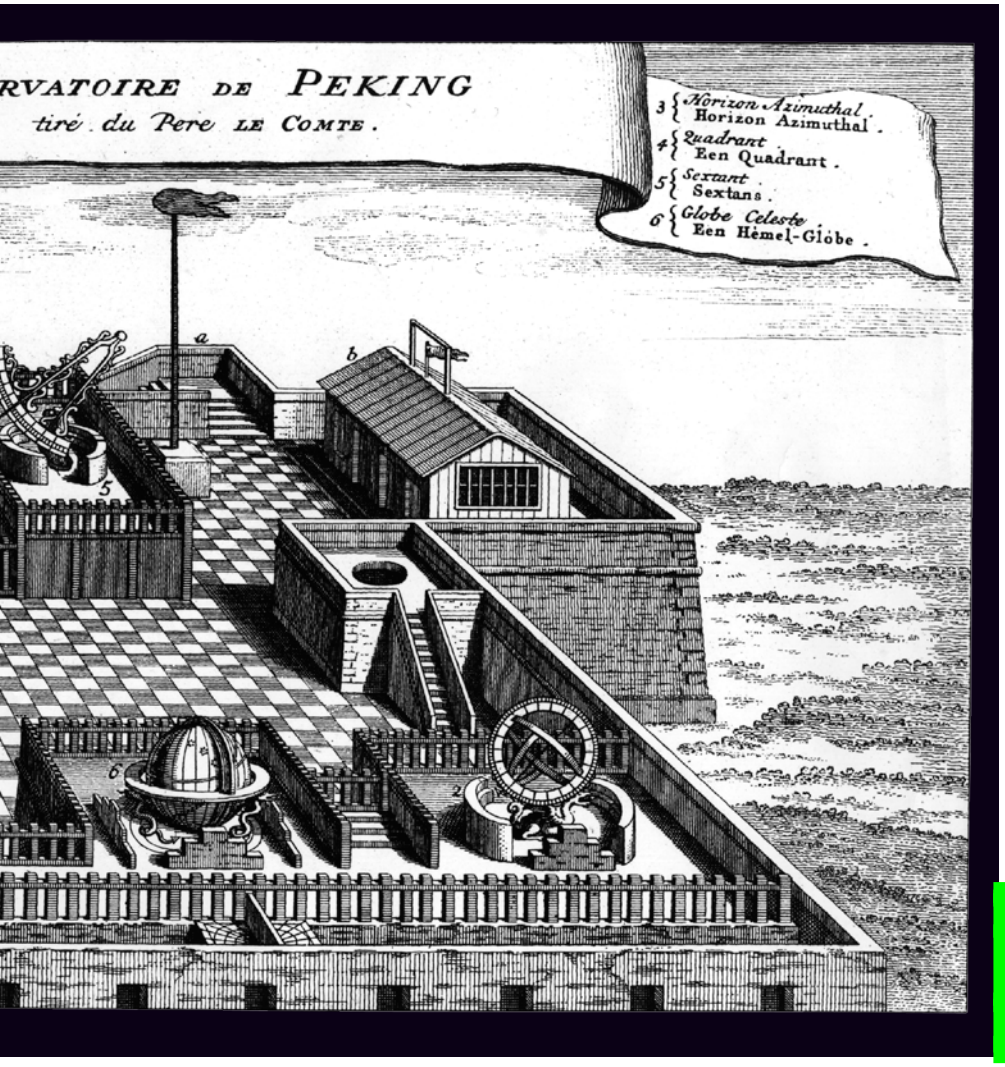
précis prouvait qu'il était le fils choisi du ciel. Le calendrier était donc lié à la légitimité d'une dynastie. Chaque dynastie chinoise produisait et nommait son propre calendrier, même si ce calendrier était parfois identique à celui de la dynastie précédente.

Sous la dynastie Ming (1368-1644), le calendrier des prédécesseurs, les empereurs mongols de la dynastie Yuan, fut préservé intact. Au XIIIe siècle, Guo Shoujing, un astronome Yuan, avait développé un système complexe de calculs qui avait mené l'astronomie chinoise traditionnelle à son apogée. De plus, l'astronomie musulmane avait rendu de bons services à cette dernière. Les prédictions des anomalies célestes étaient donc faites à l'aide des deux systèmes, et les résultats comparés aux observations astronomiques.

Malgré ces précautions, la situation de l'astronomie chinoise devint désastreuse au milieu du XVe siècle. Les astronomes Ming se contentaient de suivre les tables de calcul Yuan. Il leur fut vite impossible de produire un calendrier correct, ou même de prédire avec précision des événements tels que des éclipses de soleil.

Conscients des problèmes du calendrier, les fonctionnaires érudits proposèrent nombre de réformes, mais les astronomes de la cour, sur la défensive, firent obstruction. La plupart occupaient une fonction transmise de père en fils et gardaient leur savoir secret, ce qui leur garantissait le monopole des connaissances astronomiques. La corruption politique, qui s'était répandue depuis le milieu de la période Ming, entravait encore toute velléité de corriger le calendrier. L'empereur ignorait simplement ces propositions, et le calendrier erroné était toujours utilisé. L'arrivée des jésuites européens, au début du XVIIe siècle, fournit l'impulsion de la réforme.

Leur premier objectif était religieux, mais ils se saisirent du besoin d'un calendrier précis pour mettre un pied à la cour. Les locaux du Bureau de l'astronomie étaient situés dans la cité impériale. La proximité du monarque augmentait leurs chances de convertir l'empereur au christianisme. De plus, en montrant l'efficacité de leur astronomie, qui n'occupait pourtant qu'un rang bas dans leur arbre de la connaissance, les jésuites démontraient la supériorité de leur religion.



Le calendrier des jésuites l'emporte

En 1629, les astronomes de la cour firent une prédiction erronée pour une éclipse de soleil. L'empereur Chongzhen décida de lancer une réforme du calendrier. On monta une section spéciale au Bureau de l'astronomie afin de traduire les textes occidentaux et de fabriquer des instruments sur le modèle européen. Impliqués dans la réforme, les jésuites s'efforcèrent de se tenir au courant des derniers développements de l'astronomie en Europe. Ils assaillirent Rome de demandes d'informations sur l'astronomie européenne. Certains repartirent chercher des livres en Europe, et des jésuites expérimentés en astronomie et d'autres sciences furent recrutés, dont l'Allemand Johann Adam Schall von Bell.

Galilée et Kepler, deux des esprits les plus éclairés d'Europe, furent aussi approchés. Galilée ne donna pas suite, mais Kepler envoya des tables astronomiques. Grâce à l'effort des jésuites, un système du monde inspiré de celui de Tycho Brahe, maître de Kepler, fut transmis à la Chine, ainsi que des lunettes astronomiques, des instruments d'observation et de mesure, des formules trigonométriques et logarithmiques. Tous ces outils devinrent indispensables aux astronomes chinois.

Entre 1629 et 1633, plusieurs preuves de l'excellence du système occidental furent apportées, mais l'empereur hésitait encore à donner son autorisation officielle aux jésuites. L'astronomie chinoise était toujours bien implantée et, du côté de l'astronomie jésuite, il restait beaucoup de mesures à effectuer avant d'aboutir à un calendrier. Des facteurs culturels ont sans doute aussi joué un rôle dans son hésitation. Nombre de Chinois voyaient les jésuites comme des étrangers au même titre que les Mandchous, qui devenaient une menace inquiétante pour la dunastie Ming.

Finalement, en 1643, l'empereur affirma la supériorité de l'astronomie chinoise et proclama l'adoption du nouveau calendrier. Un an plus tard, la dynastie Ming sombrait, dépassée par la rébellion paysanne qui affaiblissait son pouvoir depuis plusieurs années. Le nouveau calendrier arrivait à point nommé pour asseoir l'autorité de la dynastie mandchoue Qing (1644-1911).

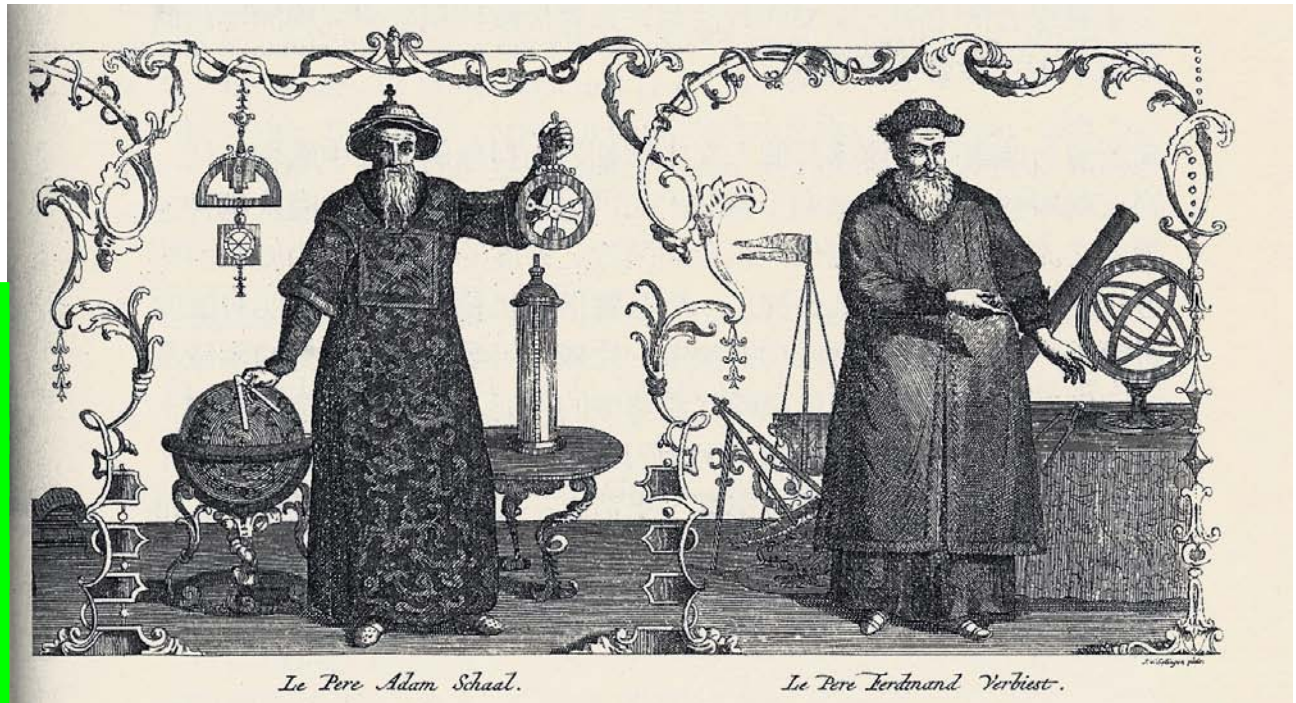
La chute des Ming fut une aubaine pour les missionnaires. Dès que les Mandchous occupèrent Pékin, ils se présentèrent avec leur nouveau calendrier. Peu après, la prédiction correcte d'une éclipse solaire prouva la suprématie de leurs méthodes sur celles des astronomes chinois et musulmans. L'empereur Shunzhi adopta le calendrier jésuite et, fin 1644, Schall était nommé directeur du Bureau. Cet échange fructueux entre le savoir technique des jésuites et le pouvoir politique des souverains mandchous renforça la légitimité de chacun.

Le plaidoyer de Verbiest

Les jésuites étaient conscients des pratiques païennes de divination depuis leur arrivée en Chine, mais ils y voyaient des coutumes inoffensives. Aussi ne les attaquaient-ils pas, sans doute trop occupés par des opposants autrement plus inquiétants, les bouddhistes, qui avaient persécuté les chrétiens chinois en 1616. Ce sont probablement des Chinois convertis au christianisme qui, les premiers, ont insisté sur la nature hérétique de la divination, soulignant que celle-ci, souvent du ressort de diverses divinités, ne se référait jamais au dieu chrétien.

En fait, si les jésuites n'avaient pas servi la cour comme astronomes, ils n'auraient jamais vu de menace dans ces coutumes populaires. Devins, diseurs de bonne aventure, médiums spirituels avaient certes l'autorité pour interpréter le futur des individus, mais, contrairement aux bouddhistes, ils n'avaient pas un pouvoir institutionnel leur permettant d'entraver les activités de la communauté chrétienne. Ils n'auraient pas dû, en théorie, être une menace sérieuse. C'était compter sans les critiques qui s'élevèrent de toute part lorsque Schall s'implanta en 1644, avec plusieurs jésuites et convertis chinois, au Bureau de l'astronomie.

A Rome, on les soupçonnait de s'être convertis aux superstitions chinoises, puisque le Bureau de l'astronomie faisait des almanachs pour choisir des dates favorables. D'autres les accusèrent d'arrogance parce qu'ils avaient essayé de sauver des âmes par des moyens laïques. D'autres encore avancèrent que leurs fonctions à la cour



À LA SUITE DE LA CONDAMNATION DU PÈRE ADAM SCHALL *(à gauche sur cette représentation du XVIIIe siècle)*, le père Ferdinand Verbiest *(à droite)* construisit tout un argumentaire fondé sur la raison pour dénoncer les pratiques divinatoires et réhabiliter l'astronomie occidentale

avaient compromis leur mission. Finalement, Schall dut se justifier. En 1662, dans un court traité, il affirma que ces pratiques ne faisaient pas partie de l'astronomie occidentale et donna les raisons pour lesquelles il les perpétuait.

En particulier, il souligna que cette incursion dans les almanachs astrologiques n'avait rien à voir avec la superstition. Les pratiques divinatoires étaient le produit de la vénération chinoise pour les anciens. Si l'empereur avait ordonné d'annoter l'almanach, c'était pour uniformiser les coutumes et les harmoniser avec le cosmos, et non parce qu'il croyait lui-même à ces pratiques. En d'autres termes, il s'agissait plus de politique que de religion.

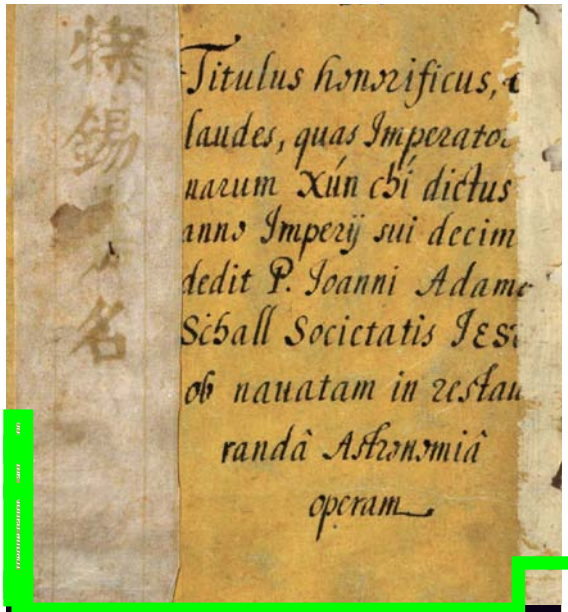
En Chine, les critiques vinrent de Yang Guangxian, un marchand défenseur du confucianisme orthodoxe. En 1659, après avoir vu une représentation de la crucifixion, Yang avait décidé de mener une campagne contre cette religion du « diable ». Outre ses charges contre le christianisme, il soutint que les changements jésuites dans le calendrier avaient pour objectif de renverser les autorités de la dynastie. Yang était aussi un expert des arts divinatoires chinois. Il signala que le Bureau de l'astronomie avait choisi une date incorrecte pour les funérailles du fils de la concubine favorite de l'empereur Shunzhi, une accusation qui impliquait des théories complexes et des calculs. Condamnés, les jésuites furent probablement surpris de constater que si leur astronomie avait survécu aux attaques de Yang sur le plan scientifique, ils étaient incapables d'échapper à la superstition chinoise.

En 1669, Ferdinand Verbiest, disciple de Schall, reprit position à la cour, notamment grâce à Yang qui ne put corriger le calendrier par les méthodes anciennes. Il prit alors le problème des superstitions à bras le corps et publia une série de traités pour défendre l'astronomie et réfuter les pratiques divinatoires chinoises.

Sa cible était claire : la théorie divinatoire de Yang Guangxian et sa pratique. Et son arme fut la raison, appliquée sur le propre terrain de Yang – les coutumes chinoises. Dans son essai *Wangze bian* (Sur l'absurdité du choix de dates favorables), il souligna qu'il existait nombre de méthodes, souvent contradictoires, pour choisir des dates. Déjà, l'empereur Hongwu de la dynastie Ming avait décrété que cette situation chaotique était insupportable et ordonné au Bureau de l'astronomie d'unifier les savoirs pertinents. Rien n'avait pu être fait. Au lieu de réfuter les théories fausses, affirme Verbiest, Yang a camouflé toutes les théories sous le terme « héritage sacré des sages » afin de parer à toute critique.

Le jésuite s'interroge aussi sur les fondements du choix des dates favorables. Citant deux textes qui font autorité en Chine, il montre que les textes divinatoires ne devraient pas être pris au pied de la lettre. Pour lui, la méthode de Yang, qui n'a pas cerné leur dimension symbolique, est simplement le résultat d'un détournement abusif des informations contenues dans l'almanach. Enfin, Verbiest en appelle à l'autorité de l'empereur qui, après tout, a proclamé l'échec de Yang à résoudre le problème du calendrier. Il en conclut que ceux qui ne comprennent pas la signification symbolique du système divinatoire sont ceux qui défient les sages et leurs traditions.

Dans son essai *Wangzhan bian* (Sur l'absurdité de l'astrologie), Verbiest attaque les méthodes de Yang en astrologie. Notamment, selon lui, Yang ne comprend rien à l'astronomie et, par conséquent, dénature l'esprit de l'astrologie. S'il n'a aucune connaissance des mouvements célestes et est incapable d'utiliser des instruments astronomiques, comment peut-il comprendre et interpréter la signification des variations des corps célestes ? Les corps célestes tournent avec régularité, ce qui peut être vérifié par toute personne comprenant les règles de ces rotations. De plus, nombre d'événements astrologiques décrits dans des livres de divination, tel le Soleil tombant sur la Terre, sont impossibles selon l'astronomie européenne.



SUR CET EDIT DE 1653, l'empereur Shunzhi donne un titre honorifique au père Adam Schall von Bell en remerciement des améliorations qu'il a apportées en astronomie.

L'AUTEUR

Pingyi CHU est historien à l'Institut d'histoire et de philologie de l'Académie chinoise à Taipei, à Taïwan.

BIBLIOGRAPHIE

Chu P., **Against prognostication : Ferdinand Verbiest's (1623-1688) criticisms of Chinese mantic arts**, *Brill*, sous presse.

Chu P., **Boundaries crossing : Western astronomy in Confucian China, 1600-1800**, http://bit.ly/15LWkJa

Chu P., **Scientific dispute in the Imperial court : The 1664 calendar case**, *Chinese Science*, vol. 14, pp. 7-34, 1992.

qui a récemment été reconnue comme la seule autorité en la matière par la cour.

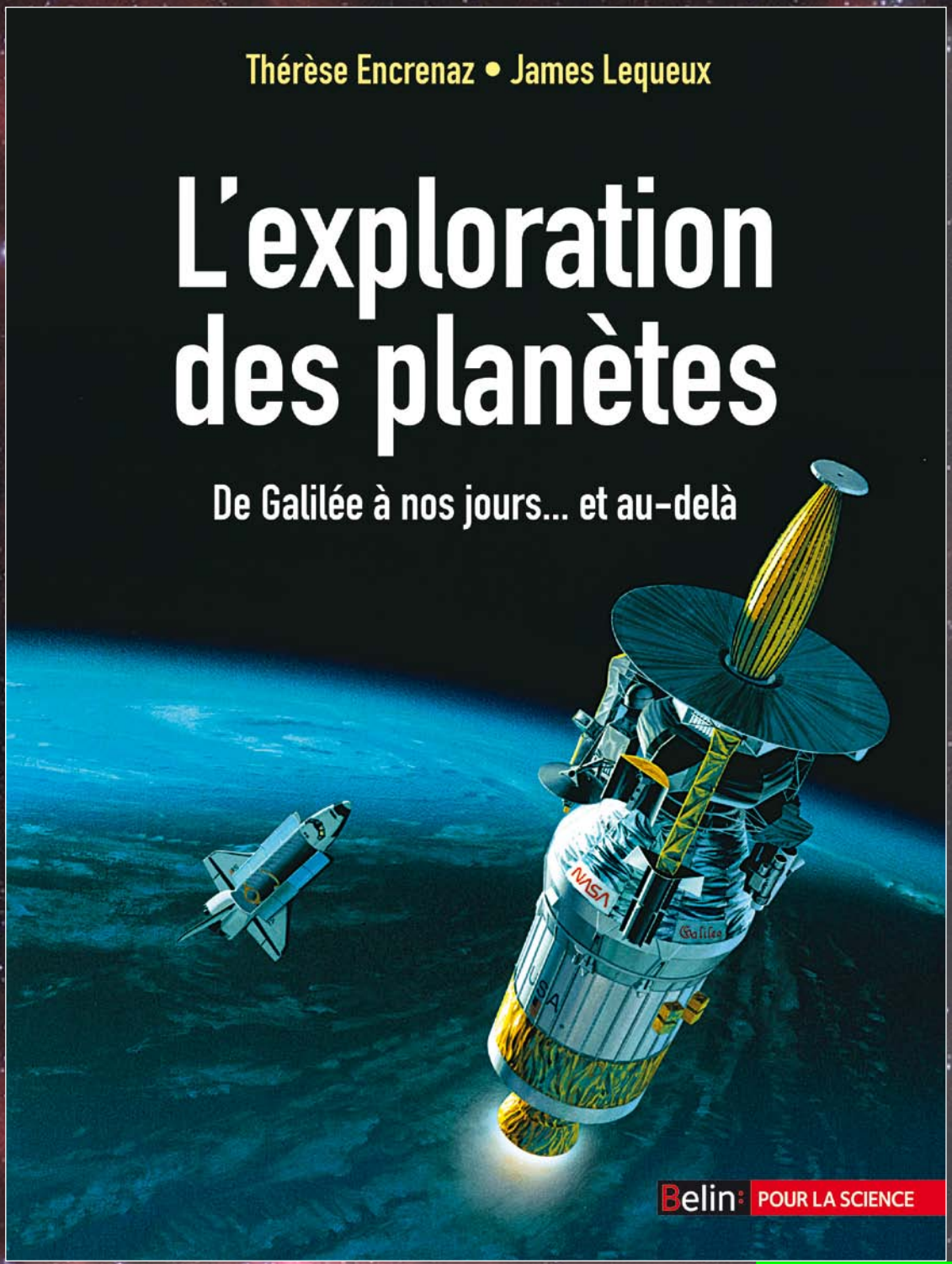
Un troisième traité, *Wangtuijixiong bian* (Sur l'absurdité de la prédiction), résume les arguments des deux précédents. Verbiest y expose les contradictions internes des arts divinatoires chinois et entend les anéantir à jamais. Il s'attaque à l'attitude méprisante de Yang envers les enseignements occidentaux. Les gens comme Yang, dont la vision ne supporte pas la lumière des nouvelles méthodes calendaires, n'ont d'autre solution que de couvrir d'une belle rhétorique leur ignorance. Toutefois, la rhétorique ne peut remplacer la précision des observations astronomiques ou des instruments, seules voies pour comprendre les opérations célestes et les applications de l'almanach. Yang est si ignorant des méthodes calendaires, des instruments et de leurs applications qu'il interprète mal le calendrier officiel en tant que texte divinatoire.

Les gens comme Yang n'ont d'autre solution que de couvrir d'une belle rhétorique leur ignorance.

Le discours de Verbiest n'a sans doute pas empêché les Chinois de pratiquer les arts divinatoires. Il a néanmoins clarifié les positions et les arguments pour ses successeurs. Le peuple de l'empire Qing, cependant, resta immergé dans une cosmologie où le futur de l'État et les affaires humaines dépendaient de l'interaction et la transformation de pouvoirs cosmologiques tel le *yinyang*.

L'astronomie occidentale et ses méthodes mathématiques devinrent indispensables à tous les Chinois qui s'intéressaient à l'astronomie. Mais les méthodes traditionnelles chinoises, héritage des anciens sages, ne pouvaient être abandonnées. On rechercha donc une reformulation idéologique qui incorporerait l'astronomie occidentale dans une astronomie chinoise revitalisée. Un astronome et mathématicien chinois, Mei Wending, s'attela à la tâche et construisit des « origines chinoises des enseignements occidentaux ». Les empereurs mandchous continuèrent à confier les questions astronomiques aux jésuites, tout en adoptant le discours de Mei. Ainsi, ils affaiblirent les ressources symboliques des jésuites tout en maximisant leurs propres intérêts. ■

Quatre siècles de conquête pacifique, de Galilée aux exoplanètes.



224 pages - 23 euros

Belin POUR LA SCIENCE

LOGIQUE & CALCUL

Les *blockchains*, clefs d'un nouveau monde

On sait maintenant réaliser des supports inscriptibles, partagés et infalsifiables. Ce qu'il est possible d'en faire est étonnant, formidable… et révolutionnaire.

Jean-Paul DELAHAYE

Imaginez qu'à la place de la Concorde à Paris, à côté de l'obélisque, on installe un très grand cahier que, librement et gratuitement, tout le monde puisse lire, sur lequel chacun puisse écrire, mais qui soit impossible à modifier et indestructible. Cela serait-il utile ? Il semble que oui.

On pourrait y consigner des engagements, comme : « Je promets de donner ma maison à celui qui prouvera la conjecture de Riemann ; signé Jacques Dupont, 11 rue Martin à Paris. » On pourrait y déposer la description de ses découvertes, afin qu'il soit impossible d'en être dépossédé. On pourrait y laisser des reconnaissances de dettes, considérées valides tant que le prêteur n'est pas venu indiquer sur le cahier qu'il a été remboursé.

On pourrait y déposer des messages adressés à des personnes qu'on a perdues de vue, en espérant qu'elles viennent les lire et reprennent contact. On pourrait y consigner des faits que l'on voudrait rendre publics définitivement, pour que l'histoire les connaisse, pour aider une personne dont on souhaite défendre la réputation, pour se venger, etc.

Pour que cela soit commode et pour empêcher les tricheurs de prendre des engagements en votre nom ou écrire en se faisant passer pour vous, il faudrait que l'on puisse signer les messages déposés de telle façon que personne ne puisse se substituer à vous. Il serait utile aussi que l'instant précis où est inscrit un texte soit indiqué à chaque fois (horodatage).

Imaginons que tout cela soit possible et qu'un tel cahier soit mis en place, auquel s'ajouteraient autant de pages nouvelles que nécessaire. Testaments, contrats, certificats de propriétés, messages publics ou adressés à une personne particulière, attestations de priorité pour une découverte, etc., tout cela deviendrait facile sans notaire ni huissier. Un tel cahier public, s'il était permanent, infalsifiable, indestructible et qu'on puisse y écrire librement et gratuitement tout ce qu'on veut, aurait une multitude d'usages.

Public, infalsifiable et indestructible

Un tel objet serait plus qu'un cahier de doléance ou un livre d'or, qui peuvent être détruits. Plus qu'un tableau d'affichage offert à tous sur les murs d'une entreprise, d'une école ou d'une ville, eux aussi temporaires. Plus que des enveloppes déposées chez un huissier, coûteuses et dont la lecture n'est pas autorisée à tous. Plus qu'un registre de brevets, dont la permanence est assurée, mais sur lesquels il est difficile d'écrire. Plus que les pages d'un quotidien, indestructibles car multipliées en milliers d'exemplaires, mais auxquelles peu de gens ont accès et dont le contenu est très contraint.

Bien sûr, ce cahier localisé en un point géographique unique ne serait pas très commode pour ceux qui habitent loin de Paris. Bien sûr, ceux qui y rechercheraient des informations en tournant les pages se gêneraient les uns les autres et gêneraient ceux venus y inscrire de nouveaux messages. Bien sûr encore, faire des recherches pour savoir ce qui est écrit dans le cahier deviendrait impossible en pratique quand le cahier serait devenu trop gros et que ses utilisateurs se seraient multipliés.

Ces trois inconvénients majeurs – localisation unique rendant l'accès malcommode et coûteux, impossibilité d'y lire ou écrire en nombre au même instant, difficultés de manipuler un grand cahier – peuvent être contournés. L'informatique moderne, avec la puissance de ses machines, y compris les smartphones et ses réseaux de communication, est en mesure de les surmonter.

Cette idée d'un grand cahier informatique, partagé, infalsifiable et indestructible

UN GRAND CAHIER IMPOSSIBLE A EFFACER

et mis à la disposition de tous, par exemple sur la place de la Concorde à Paris, serait-il utile ? Oui, si ce cahier est informatisé. Il pourrait donner plus de liberté et dispenser du recours à des autorités administratives, monétaires, juridiques, etc. De tels « grands cahiers partagés » existent aujourd'hui grâce au réseau Internet : les *blockchains*. Il s'en crée chaque jour de nouveaux. Les *blockchains* sont notamment à l'origine d'un nouveau type de monnaies – les cryptomonnaies, telles que le fameux bitcoin. Cependant, bien d'autres applications sont possibles : systèmes universels de courrier, instruments notariés et financiers décentralisés, systèmes de votes en ligne sécurisés, etc.

du fait même de sa conception est au cœur d'une nouvelle révolution, celle de la *blockchain*, ou plus explicitement et en français : la révolution de la programmation par un fichier partagé et infalsifiable.

Une idée mise en œuvre pour les bitcoins

Le terme *blockchain* vient du bitcoin, la monnaie cryptographique créée en janvier 2009 et qui a depuis connu un développement considérable et un succès réel, la valeur d'échange des bitcoins émis dépassant aujourd'hui deux milliards d'euros. Au cœur de cette monnaie, il y a effectivement un fichier informatique infalsifiable et ouvert. C'est celui de toutes les transactions, et son inventeur Satoshi Nakamoto l'a nommé *blockchain*.

C'est un fichier partagé : tout le monde peut le lire et chacun y écrit les transactions qui le concernent, ce qui les valide. La *blockchain* existe grâce à un réseau pair à pair, c'est-à-dire géré sans autorité centrale par les utilisateurs eux-mêmes. Certains de ces utilisateurs détiennent des copies de la *blockchain,* qui se trouve donc présente partout dans le monde. Ces centaines de copies sont sans cesse mises à jour simultanément, ce qui rend la *blockchain* totalement indestructible, à moins d'une catastrophe qui toucherait toute la planète. Ce fichier a été rendu infalsifiable par l'utilisation de procédés cryptographiques qui, depuis sa création en 2009, résistent à toutes les attaques : personne n'a pu effacer ou modifier le moindre message de transaction déjà inscrit dans la *blockchain* du bitcoin *(voir l'encadré page 83)*.

Le rêve du grand cahier de la place de la Concorde est ainsi devenu réalité. D'ailleurs, ce que l'informatique moderne, les réseaux et la cryptographie ont créé dans le monde numérique est bien supérieur à tout ce qu'on aurait pu faire avec du papier, du métal ou des dispositifs matériels usuels.

La *blockchain* évite les trois inconvénients majeurs cités précédemment. Grâce aux réseaux, on y accède instantanément de n'importe où dans le monde, pourvu qu'on dispose d'un ordinateur ou d'un smartphone. Des milliers d'utilisateurs peuvent le consulter simultanément sans se gêner. Et chacun peut, gratuitement et sans limitation, ajouter de nouveaux messages de transactions selon un procédé qui assure la cohérence et la robustesse du fichier *blockchain*.

La *blockchain* du bitcoin augmente en taille peu à peu, mais elle reste manipulable par les formidables machines dont nous disposons tous aujourd'hui. Elle comporte aujourd'hui 28 gigaoctets ($2{,}8 \times 10^{10}$ caractères), soit l'équivalent d'environ 28 000 ouvrages de 200 pages.

Avec un ordinateur et une connexion, on accède librement à tout le contenu de cette *blockchain*, presque instantanément

et de n'importe où. C'est ce qui, dans le cas du bitcoin, permet de calculer le solde des comptes. Les systèmes de signatures cryptographiques garantissent que les messages de transaction que vous inscrivez sur la *blockchain* ont été écrits et signés par vous et vous seul. L'ordre des inscriptions fournit aussi une datation des transactions (horodatage) et donc les ordonne. Tout cela est fait sans l'intervention d'une quelconque autorité centrale, puisque ce sont certains des utilisateurs (dénommés mineurs dans le cas du bitcoin) qui en opèrent la surveillance, et qui se contrôlent mutuellement, assurant l'honnêteté des sauvegardes et leur cohérence.

L'exemple de la monnaie bitcoin est la plus spectaculaire et la plus visible aujourd'hui des merveilles que réalise une *blockchain*. Qu'on ait pu ainsi créer une monnaie grâce à un fichier partagé semble incroyable. D'autant plus qu'il s'agit d'une monnaie d'un nouveau type : elle ne repose sur aucune autorité émettrice et autorise des transactions quasi instantanées et gratuites d'un point à l'autre du globe *(voir la rubrique Logique & calcul dans Pour la Science de décembre 2013)*.

Au-delà de l'exemple du bitcoin, c'est l'ensemble de tout ce que rend possible une *blockchain* que nous voulons évoquer, car un nouveau monde économique, social, administratif et politique pourrait en sortir, dont on n'a pas pris la mesure.

Le bitcoin utilise une *blockchain* qui lui est propre et ne sert, *a priori*, qu'à inscrire des transactions. Cependant, l'idée de cette *blockchain* se décline d'une multitude de manières qui donnent naissance à autant d'applications nouvelles. Il s'agit là d'un nouveau type d'objets contenant des informations d'une complexité presque sans limites. Nos ordinateurs aux extraordinaires capacités de calcul y accèdent instantanément, en explorant ce qui s'y trouve, en y déposant de nouveaux messages éventuellement cryptés, et en les extrayant rapidement. Ces nouveaux objets, du fait de leur nature numérique et de leurs robustesse et ubiquité, ont des propriétés tout à fait inédites.

Il existe aujourd'hui des centaines de variantes du modèle bitcoin. Ce sont essentiellement d'autres cryptomonnaies, dont chacune s'appuie sur une *blockchain* particulière. Comme l'idée de Nakamoto est beaucoup plus générale, d'autres systèmes à *blockchain* apparaissent ou sont en cours de développement.

Certaines des idées évoquées au départ peuvent se mettre en place soit grâce à une nouvelle *blockchain*, soit en essayant d'utiliser la *blockchain* du bitcoin qu'on détournera de sa fonction première pour lui faire réaliser des opérations non prévues par Satoshi Nakamoto. L'Américain Dom Steil, un entrepreneur s'occupant du bitcoin et auteur de nombreux articles sur les nouvelles technologies, a exprimé l'idée de cette révolution :

« La *blockchain* est intrinsèquement puissante du fait que c'est la colonne vertébrale d'un nouveau type de mécanisme de transfert et de stockage distribué et *open source*. Elle est le tiers nécessaire pour le fonctionnement de nombreux systèmes à base de confiance. Elle est la feuille universelle d'équilibrage utilisée pour savoir et vérifier qui détient divers droits numériques. De même qu'Internet a été la base de nombreuses applications autres que le courrier électronique, la *blockchain* sera la base de bien d'autres applications qu'un réseau de paiement. Nous en sommes aux premiers instants d'un âge nouveau pour tout ce qui est possible au travers d'un réseau décentralisé de communications et de calculs. »

Le Canadien Jon Evans, un ingénieur informaticien et journaliste spécialisé dans les nouvelles technologies, partage cet enthousiasme : « La technologie *blockchain* au cœur du bitcoin est une avancée technique majeure qui, à terme, pourrait révolutionner Internet et l'industrie de la finance ; les premiers pas de cette révolution à venir ont maintenant été franchis. [...] La *blockchain* le moteur qui sert de base au bitcoin, est un système distribué de consensus qui permet d'exécuter des transactions et d'autres opérations de manière sécurisée et contrôlée, sans autorité centrale de supervision, cela (en simplifiant) parce que les transactions et toutes les opérations sont validées par le réseau entier. Les opérations effectuées ne sont pas nécessairement financières et les données ne sont pas nécessairement de l'argent. Le moteur qui donne sa puissance au bitcoin est susceptible d'un large éventail d'autres applications. »

Parmi les *blockchains* autres que celle du bitcoin et ayant pour objets des applications non liées à la monnaie, il faut citer *Namecoin*, un système décentralisé d'enregistrement de noms : on écrit sur la *blockchain* de *Namecoin* des paires {nom, message}. L'un des objectifs de *Namecoin* est la mise en place d'un système d'adresses pour les ordinateurs connectés au réseau, système qui pourrait se substituer à l'actuel DNS (*Domain Name System*) en partie aux mains d'organisations américaines.

Les créateurs de cette *blockchain* affichent les objectifs suivants : protéger la liberté d'expression en ligne en rendant le Web plus résistant à la censure ; créer un nom de domaine « .bit » dont le contrôle serait totalement décentralisé ; mémoriser des informations d'identité telles que des adresses électroniques ou des clefs cryptographiques publiques. Ils évoquent aussi la possibilité d'organiser des votes ou des services notariés. Malheureusement, cette *blockchain* est aujourd'hui peu commode, car les dépôts d'informations y sont payants (en namecoins, une cryptomonnaie), et même si les coûts sont très faibles, ils compliquent son utilisation.

Plus récemment a été créé *Twister,* un système concurrent de *Twitter* (le système de microblogage bien connu), mais totalement décentralisé et donc libre de toute censure ou contrôle. La *blockchain* de *Twister* ne sert pas à stocker toute l'information de la plateforme de microblogage distribuée sur un réseau pair à pair, ce qui évite que les nœuds du réseau aient à gérer

« Une avancée technique majeure qui, à terme, pourrait révolutionner Internet et l'industrie de la finance. »

Pas de fausse *blockchain* !

Pour rendre une *blockchain* robuste et impossible à simuler, on utilise une fonction de hachage *h* (publique) qui à tout fichier F associe [illegible] dénommée empreinte.

Quand on change un seul caractère de F, le code *h*(F) est totalement changé et ce de façon imprévisible. Il est impossible en pratique de modifier F en F' de manière que *h*(F) = *h*(F') *(voir la rubrique Logique & calcul d'avril 2014)*.

On utilise aussi une preuve de travail. C'est une fonction *p* qui, à toute valeur *V* donnée (en général, *V* est une suite de caractères qui détermine un problème), associe une solution *p*(*V*) qui ne s'obtient qu'en menant un long calcul, par exemple d'une durée d'une heure avec une machine de bureau ordinaire. En revanche, vérifier que *p*(*V*) est la bonne valeur associée à *V* est rapide. Calculer le résultat *R* de *p*(*V*) est difficile, mais vérifier que *p*(*V*) = *R* est facile. Un exemple est la décomposition d'un nombre en facteurs premiers, qui est difficile, alors que la vérification que le produit de ces facteurs donne le bon résultat est facile.

Construisons une *blockchain* en concaténant des *blocks* contenant des suites de caractères représentant des messages, ou des transactions : *blockchain* = *block*(1)-*block*(2)-...-*block*(*n*

Le *block*(*i*) commence par deux informations particulières *h*(*i*) et *p*(*i*) ajoutées aux messages qui en constituent le contenu. Ces informations *h*(*i*) et *p*(*i*) assurent qu'on ne pourra ni modifier la *blockchain*, ni fabriquer après coup de fausses *blockchains*.

p(*i*) sera l'empreinte de ce qui précède *block*(*i*). Autrement dit, *h*(*i*) = *h*[*block*(1)-···-*block*(*i* – 1)].

p(*i*) sera une preuve de travail associée à *h*(*i*) : *p*(*i*) = *p*[*h*(*i*)].

Le calcul des *h*(*i*) et *p*(*i*) se fera progressivement avec l'ajout des *blocks*. Chaque *p*(*i*) exige peut-être une heure de calcul en moyenne, mais résulte d'un calcul collectif qui a pris beaucoup moins qu'une heure par participant. Le calcul de tous les *p*(*i*) se fait progressivement : pour le bitcoin, on a ajouté un *block* toutes les dix minutes depuis janvier 2009 et l'on rétribue ceux qui mènent les calculs.

Quand la *blockchain* comporte de nombreuses pages (la *blockchain* du bitcoin en a environ 300 000), faire une fausse *blockchain* est impossible, car cela demande trop de calculs. Pour 300 000 pages « coûtant » chacune une heure de calcul, il faudrait faire un calcul de 300 000 heures, soit 34 années (et pour le bitcoin, il existe d'autres garde-fous qui font que le calcul est bien plus long). Cependant, vérifier que la *blockchain* est cohérente est facile :

1) On vérifie que chaque *h*(*i*) est convenable en recalculant sa valeur, ce qui est possible car tout est public. C'est rapide et cela assure que rien n'a été modifié dans les *blocks*. 2) On vérifie les *p*(*i*), ce qui est rapide aussi.

Une telle *blockchain* est un objet numérique que chacun peut contrôler rapidement, mais que personne ne peut modifier sans se faire repérer et que personne ne peut imiter, car pour cela il faudrait mener un énorme calcul.

de trop gros volumes de données), mais seulement les informations d'enregistrement et d'authentification. Les messages sont gérés par un système de dépôt distribué (c'est-à-dire répartis entre les utilisateurs) avec une table permettant de savoir où se trouvent les informations, comme cela se pratique dans les réseaux pair à pair de partage de musique.

Un projet plus ambitieux, car se voulant le support possible d'applications complexes fondé sur une notion de contrat *(smart-contract)*, est en cours de développement : il se nomme *Ethereum*. La *blockchain* associée émettra une monnaie (des *éthers*) sur le modèle du bitcoin, mais ce ne sera qu'une de ses fonctions.

Relier les chaînes

Une autre avancée toute récente dans ce domaine a été proposée par un groupe de chercheurs associé à Adam Back, inventeur britannique d'un système de preuve de travail *(voir cette rubrique dans Pour la Science d'avril 2014)* utilisé comme élément du protocole du bitcoin. Adam Back et ses collègues ont constaté que le bitcoin évolue très lentement, les décisions pour tout changement se faisant selon un processus où il faut un accord difficile à obtenir de la part de ceux qui travaillent à le surveiller et qui ne sont pas organisés en structure hiérarchique : c'est un problème avec les applications totalement décentralisées dont le contrôle n'est aux mains de personne.

Adam Back a aussi noté que beaucoup d'idées innovantes proposées par des *blockchains* nouvelles n'ont qu'un succès limité ; en valeur, le bitcoin reste très dominant parmi les monnaies cryptographiques. Lui et ses collègues ont donc mis au point une méthode liant les *blockchains*. Ce système de *sidechain* permettra de faire passer des unités monétaires d'une chaîne A vers une autre, B. Elles disparaîtront de la chaîne A pour réapparaître sur B et pourront éventuellement revenir dans A.

Chaque *blockchain* est un petit univers où il est utile de disposer d'une monnaie (comme sur *Namecoin*) ; cependant, faire accepter une nouvelle monnaie et stabiliser

Mieux que *Leboncoin*, *eBay*, *Priceminister*, etc.

Le commerce entre particuliers sur Internet est freiné par un problème de confiance. Vous mettez en vente un magnifique vase, vous trouvez un acheteur, vous lui vous envoie l'argent et vous gardez le vase...

Même si c'est malhonnête, il est économiquement rationnel pour celui qui reçoit l'envoi de son correspondant de ne pas envoyer ce qu'il a promis en échange. *eBay* précise d'ailleurs : « Nous ne pouvons pas obliger le vendeur à remplir ses obligations. »

Leboncoin recommande l'échange en direct avec rencontre. L'envoi contre remboursement est une solution et certains sites (parfois associés à *Paypal*) proposent leurs services pour limiter les risques. Soit ils bloquent l'argent envoyé avant que le produit ne soit reçu ; soit ils proposent un système de notation qui indique si les personnes avec qui on fait affaire ont été correctes dans leurs précédentes transactions ; soit ils proposent une assurance.

Il existe pourtant une meilleure solution grâce aux *blockchains*. Oleg Andreev a proposé un système inspiré par la *blockchain* du bitcoin, qui résout le problème sans frais. L'idée s'applique à toute *blockchain* disposant d'un système d'unités monétaires permettant les transactions à plusieurs entrées et plusieurs sorties (c'est le cas de la *blockchain* du bitcoin).

Supposons qu'Alain veuille vendre un vase à 100 euros à Béatrice qui habite loin. Ils sont d'accord sur le prix, mais doivent faire l'échange à distance. Alain et Béatrice, indépendamment des 100 euros convenus, déposent chacun 200 euros sur un compte particulier. Lorsque l'échange sera terminé (envoi du vase et envoi des 100 euros pour le payer), Alain et Béatrice signeront la transaction qui débloquera les 400 euros, lesquels seront alors restitués : 200 pour Alain, 200 pour Béatrice.

La procédure de mise sous séquestre sur la *blockchain* est telle que personne ne peut s'emparer de cet argent, sauf Alain et Béatrice s'ils donnent tous deux leur accord. Seul, aucun d'eux ne peut rien faire. En conséquence, à moins d'être prêt à perdre 200 euros pour un objet qui en vaut 100, Béatrice aura intérêt à payer le vase. De même, si Béatrice paye avant de recevoir le vase, Alain aura intérêt à envoyer le vase (qui vaut 100 euros) pour récupérer ses 200 euros bloqués. Il est ainsi économiquement rationnel de se comporter honnêtement !

La somme de 200 euros pour une transaction concernant un objet qui en vaut 100 est modifiable, mais il faut que la somme mise sous séquestre par les deux acteurs soit supérieure à la valeur de l'objet échangé. Sinon, celui qui reçoit l'envoi de l'autre en premier aura intérêt à ne pas envoyer ce qu'il doit, quitte à perdre la somme séquestrée. Ce système à base de *blockchain* permet, sans l'action d'aucune autorité centrale, de mener une opération d'échange avec un risque très réduit de se faire escroquer (pour des précisions sur la mise en œuvre technique, voir http://bit.ly/1BuoupD ou http://voluntary.net/bitmarkets/).

son cours est difficile et incertain. De plus, chaque *blockchain* est une expérience aux risques d'autant plus grands qu'elle est récente et innovante. Une fois mis en place, le système des *sidechains* (ce n'est pas si simple et, aujourd'hui, aucune *sidechain* ne fonctionne) permettra de tester rapidement de nouvelles idées. Chacune pourra « importer » la monnaie d'une autre *blockchain*, sans doute le bitcoin, la monnaie la mieux installée et celle pour laquelle la confiance est la plus forte. Le système est conçu pour que la chaîne qui « prête » de l'argent à une autre n'engage pas plus que ce qu'elle prête ; elle ne prend donc pas de risque.

Avec un tel système, non seulement les diverses *blockchains* ne se concurrenceront plus nécessairement, toutes pouvant s'appuyer sur une seule ou un petit nombre d'entre elles, mais de plus toutes les expérimentations pourront être envisagées sans crainte, créant une dynamique propice aux innovations.

Plutôt que d'expliquer les architectures complexes et spécifiques de *Namecoin*, *Twistter* ou *Ethereum*, terminons en présentant les applications générales les plus simples d'une *blockchain*.

Des outils cryptographiques

Une *blockchain* est un fichier numérique accessible à tous en lecture et en écriture. Cela se fait par l'utilisation de logiciels parfois nommés *servents*, terme qui associe les deux mots *client* et *serveur* utilisés dans les réseaux centralisés. Ce mot marque que, dans un réseau pair à pair, chaque nœud est à la fois nœud central (serveur) et utilisateur (client).

Le fichier *blockchain* est rendu infalsifiable et indestructible par l'utilisation d'outils cryptographiques. Quand on ajoute quelque chose au fichier (on parle de *page* ou de *block*), on le fait en commençant l'ajout par un code calculé à partir de la version avant ajout (pour calculer ces codes, on utilise des fonctions de hachage). On ne pourra donc pas modifier la partie ancienne de la *blockchain* sans que cela se voie, ou alors il faudrait modifier chacun des codes commençant les pages : les codes rigidifient le fichier.

De plus, pour qu'il soit difficile de fabriquer une *blockchain* entièrement artificielle avec de bons codes en tête de chaque page ajoutée et qui prétendrait se substituer à la vraie *blockchain*, le protocole de gestion exige qu'on fasse un certain travail de calcul pour ajouter une page ; c'est la notion de *preuve de travail* (*voir l'encadré page 83*). Par conséquent, fabriquer une fausse *blockchain*, ou même seulement une fausse partie finale de *blockchain*, est excessivement coûteux, voire impossible, en pratique. Au total, le fichier *blockchain* ne peut être ni modifié ni simulé. Comme la *blockchain* existe en une multitude de

copies (une chez chacun de ceux qui acceptent de participer à la bonne marche du protocole), la *blockchain* d'une application particulière est indestructible et impossible à truquer.

La taille de la *blockchain* augmente à mesure qu'y sont déposés de nouveaux messages ou de nouvelles pages regroupant plusieurs messages. Les multiples copies de la *blockchain* sont toutes maintenues identiques grâce aux échanges d'informations opérés par le réseau pair à pair.

L'accroissement de taille de la *blockchain* est bien sûr un grave problème. Aujourd'hui, on peut manipuler des *blockchains* de plusieurs dizaines de gigaoctets, mais on ne peut pas en manipuler qui seraient 1 000 fois plus grandes. La technologie de demain le permettra peut-être, mais il y aura toujours une limite, certes élevée, à prendre en compte.

Bien évidemment, une *blockchain* peut servir à déposer anonymement des messages. Grâce au logiciel installé sur sa machine (le *servent*) et propre à la *blockchain*, on ira écrire tout ce qu'on souhaite. Pour éviter que les interventions sur la *blockchain* se fassent avec une trop grande fréquence (ce qui rendrait difficile la synchronisation de tous les détenteurs d'une copie), le protocole de fonctionnement pourra ajouter les messages par page, chaque page en contenant plusieurs centaines ou milliers ; ainsi, pour le bitcoin, les transactions sont regroupées et ajoutées une fois toutes les dix minutes.

Les messages qu'on ajoutera sur une *blockchain* seront anonymes ou signés. Avec les systèmes de signature à double clef, tout le monde peut vérifier l'auteur d'un message signé et il est impossible que quelqu'un signe à la place d'un autre.

Les messages ajoutés seront en clair ou chiffrés. On pourra ainsi déposer un message chiffré qu'on ne rendra lisible que plus tard en publiant la clef de déchiffrement. Ce sera utile dans le cas d'un engagement (tel qu'une reconnaissance de dette) pris vis-à-vis d'un débiteur, vous par exemple. Votre engagement est présent signé, daté et crypté sur la *blockchain*. Si vous le respectez, il reste crypté. Sinon, celui envers qui vous êtes engagé publie la clef de déchiffrement et tout le monde voit que vous ne tenez pas votre engagement. Grâce à la signature, il n'y a pas de doute, c'est bien vous qui avez pris l'engagement. Cette publication détruit votre réputation ou même sert de preuve devant un tribunal.

Une *blockchain* peut servir à concevoir une messagerie universelle. Pour qu'il y ait confidentialité des messages et garantie sur leurs auteurs, on utilisera là aussi la cryptographie asymétrique. Celui qui veut déposer la démonstration d'un théorème qu'il a trouvée, mais sans la rendre publique, déposera la version cryptée avec une clef privée (créée pour cet usage) et il signera le dépôt. Quand, plus tard, il voudra prouver qu'il disposait bien, dès la date de dépôt, de la démonstration, il rendra publique la clef de déchiffrement. Plus besoin des enveloppes *Soleau* déposées à l'Institut national de la propriété industrielle. Bien sûr, on pourra de la même façon déposer des engagements, des testaments, des œuvres signées, etc.

Une forme numérique d'anarchisme

Insistons sur le fait qu'un tel système de *blockchains* permettant signatures, contrats, dépôt de testaments, etc. n'exige l'action d'aucune autorité centrale pour fonctionner. Tout ira bien pourvu que le fichier *blockchain* soit maintenu, c'est-à-dire qu'un minimum d'utilisateurs participe à son entretien en en gardant une copie chez eux, mise à jour en permanence (ce que leur ordinateur fait tout seul).

La complexité et la puissance de nos ouces, de nos machines, de nos applications, de nos réseaux informatiques donnent naissance à de nouveaux objets numériques. Ces *blockchains* changent les règles du eu : moins de centralisation, moins d'autorité, plus de partages sont possibles. Une forme d'anarchisme numérique qui existe déjà sur Internet va se développer et changera sans doute les rapports entre humains et entre entreprises. Le monde qui en émergera est difficile à imaginer, mais il se forme et il est imminent. ■

L'AUTEUR

J.-P. DELAHAYE est professeur émérite à l'Université de Lille et chercheur au Centre de recherche en informatique, signal et automatique de Lille (CRISTAL).

BIBLIOGRAPHIE

A. Back *et al.*, **Enabling blockchain innovations with pegged sidechains,** 2014 (http://static1.blockstream.com/sidechains.pdf).

S. Nakamoto, **Bitcoin : A peer-to-peer electronic cash system,** 2008 (https://www.bitcoin.org/bitcoin.pdf).

N. Szabo, **The idea of smart contracts,** 1997 (http://szabo.best.vwh.net/idea.html).

J. Haight, **Beyond bitcoin : Why the block chain is what really matters,** *Computerworld*, novembre 2014, (www.computerworld.com/article/2851414/).

E. Rosenfield, **Forget currency, bitcointech is the revolution,** CNBC, novembre 2014 (www.cnbc.com/id/102128309#).

Références supplémentaires sur le site www.pourlascience.fr

Retrouvez la rubrique Logique & calcul sur www.pourlascience.fr

SCIENCE & FICTION

Trop d'extraterrestres à notre image

Deux bras, deux jambes, une symétrie gauche-droite, etc. : dans les films ou les livres, l'extraterrestre est le plus souvent un humanoïde. Pourtant, sur notre planète, le vivant présente une diversité morphologique bien plus grande !

Roland LEHOUCQ et Jean-Sébastien STEYER

Face à la diversité croissante d'espèces extraterrestres dans les films et la littérature de science-fiction, il était temps d'y mettre de l'ordre. En 2006, le cinéaste français Denis Van Waerebeke a donc réalisé un court-métrage intitulé *Classification systématique du vivant extraterrestre*. Dans ce documentaire humoristique, il classe d'après leur morphologie les extraterrestres rencontrés dans les œuvres de fiction.

Cette analyse révèle que la forme humanoïde est surreprésentée. Cela se comprend si l'on considère qu'il fut un temps où l'acteur jouant le rôle d'extraterrestre devait pouvoir enfiler son costume sans que ses mouvements soient trop limités. Autre avantage cinématographique, nous déchiffrons mieux les émotions d'un alien anthropomorphe. Imaginez un extraterrestre sphérique avec une surface quasi lisse : pas facile de savoir s'il est content ou agressif !

Cette contrainte de forme aurait pu disparaître grâce aux effets spéciaux numériques ou aux acteurs virtuels. Il n'en est rien. Dans le film *Les gardiens de la Galaxie* (James Gunn, 2014), tous les héros sont humanoïdes, même Groot, une sorte d'arbre qui exhibe malgré tout des caractères humains.

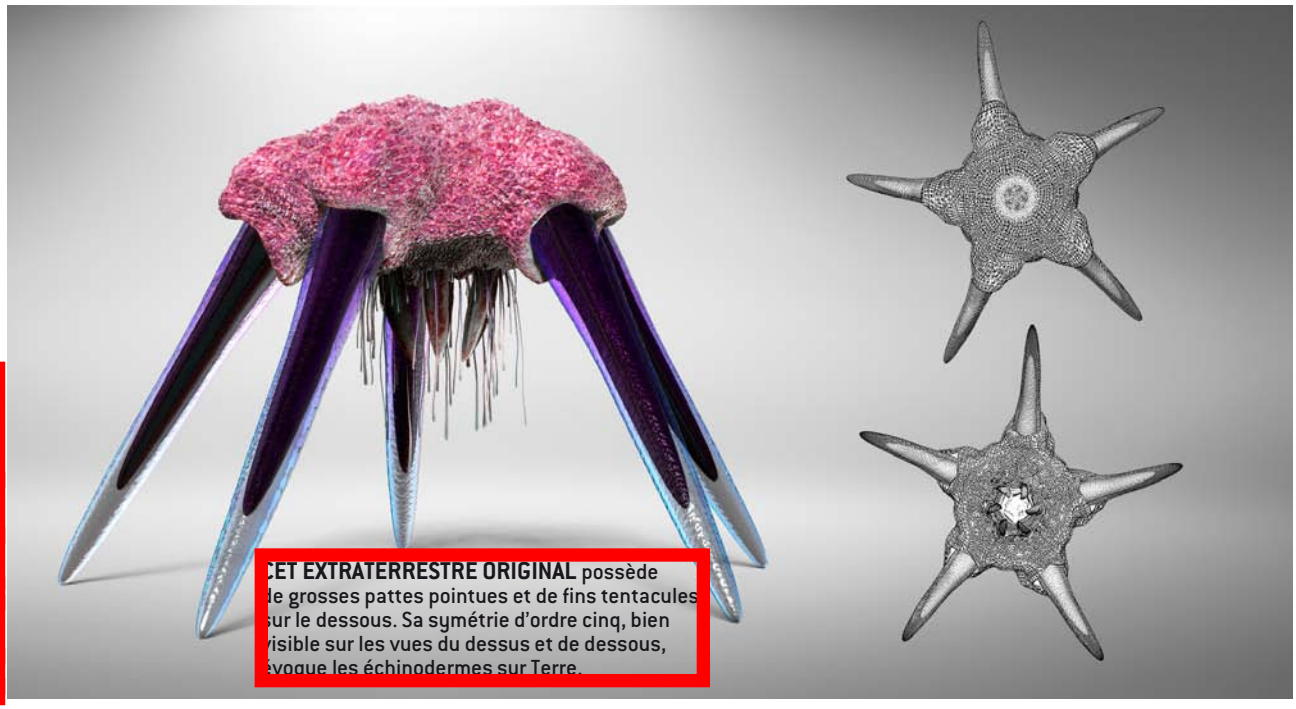
Notre anthropocentrisme est si tenace que les réalisateurs et les écrivains ne s'inspirent guère de la biodiversité terrestre. Cette dernière réserve pourtant bien des surprises, et la forme humanoïde est loin d'y dominer. Par exemple, les spongiaires, des organismes pluricellulaires apparus dans les océans il y a au moins 580 millions d'années, n'ont pas de forme précise. Dénués d'organes ou de tissus réellement différenciés, ils adoptent des morphologies variées en fonction des courants marins. Leur forme s'organise autour d'une unique ouverture qui capte la nourriture. Les éponges présentent tout de même une polarité haut-bas, et certaines sont symétriques autour d'un axe central : on parle alors de symétrie axiale.

Reste que peu d'œuvres de science-fiction contiennent des aliens en forme d'éponges. Citons toutefois le film *The Blob* (Irvin Yeaworth Jr. en 1958 et repris par Chuck Russell en 1988), bien que cet envahisseur ressemble plus à un gel bactérien visqueux qu'à une éponge.

Proches cousins des spongiaires, les cnidaires constituent un groupe comprenant des formes libres (méduses) et des formes fixes (coraux et anémones), soit plus de 10 000 espèces. Ces animaux arborent des symétries radiales d'ordre quatre ou six (symétrie par rotation d'angle $2\pi/4$ ou $2\pi/6$), autour d'un orifice entouré de tentacules et faisant office à la fois de bouche et d'anus.

La structure des organismes dits bilatériens nous est plus familière, avec une symétrie qui définit un côté gauche et un côté droit selon un axe antéro-postérieur, dorso-ventral ou médio-latéral. Les bilatériens ont fait leur apparition à la même époque que les spongiaires. Ils regroupent tous les animaux autres que les cnidaires

DANS *LES GARDIENS DE LA GALAXIE*, tous les héros du film ont un aspect humanoïde même s'ils diffèrent par la couleur de leur peau, s'ils ressemblent à un arbre ou à un raton-laveur.



CET EXTRATERRESTRE ORIGINAL possède de grosses pattes pointues et de fins tentacules sur le dessous. Sa symétrie d'ordre cinq, bien visible sur les vues du dessus et de dessous, évoque les échinodermes sur Terre.

et les spongiaires, c'est-à-dire les vers, les arthropodes, les mollusques, les échinodermes et les vertébrés.

Quel est l'intérêt évolutif d'une symétrie bilatérale ? Un bilatérien n'est plus limité à une forme circulaire, ce qui rend possible des morphologies très variées et parfois plus adaptées à l'environnement. En outre, une symétrie bilatérale assure une certaine mobilité de l'animal, car elle permet d'équilibrer la traînée du côté gauche et celle du côté droit lors du déplacement, et donc de ne pas nager ou voler en rond !

En science-fiction, pour donner des repères au spectateur, on ne rencontre presque que des êtres vivants chez qui on reconnaît spontanément une symétrie bilatérale, une tête ou des yeux. C'est donc beaucoup de formes du vivant terrestre qui sont ignorées quand il s'agit d'imaginer des extraterrestres !

Or il existe de nombreuses « curiosités » terriennes. Par exemple, la plupart des échinodermes présentent une symétrie radiale d'ordre cinq, dite pentaradiée – ils perdent leur bilatéralité au cours de leur développement et exhibent cette nouvelle symétrie à l'âge adulte.

Notons que très peu d'animaux sur Terre ont développé une symétrie radiale d'ordre trois : c'est le cas des trilobozoaires, un groupe de fossiles marins, très anciens (il y a environ 550 millions d'années) et dont la plupart ressemblaient à de petits disques ornementés. Dans le roman *Rendez-vous avec Rama* (1972), Arthur C. Clarke décrit l'arrivée dans le Système solaire d'un gigantesque et énigmatique vaisseau. L'exploration de cet appareil, avant qu'il ne reparte, soulève bien des questions, mais révèle que les êtres qui en sont à l'origine ont une symétrie ternaire.

De nouvelles formes, au gré de l'évolution

La forme d'un organisme, qu'elle soit symétrique ou non, est le fruit de l'évolution des espèces : les mutations aléatoires génèrent une certaine diversité (les évolutionnistes préfèrent le terme de disparité) qui est retenue ou non selon, notamment, les conditions du milieu, c'est-à-dire les contraintes physiques.

Ainsi, sur Terre en tout cas, les plantes arborescentes adoptent presque toutes la même structure : un axe principal vertical, le tronc, qui prend racine dans le sol et porte des appendices secondaires, les branches. On peut considérer cette forme caractéristique comme une réponse aux contraintes environnementales : un arbre capte d'autant plus de lumière qu'il est haut et étendu, et puise d'autant plus de nutriments que ses racines se développent. Cette structure était déjà présente chez les fougères arborescentes du Carbonifère, il y a environ 300 millions d'années.

Autre exemple, chez les animaux cette fois, plusieurs appendices natatoires sont apparus au cours de l'évolution : chez les « poissons » bien sûr, mais aussi chez les ichtyosaures (reptiles marins d'il y a entre 255 et 90 millions d'années), chez les oiseaux plongeurs (manchots) ou chez les mammifères aquatiques (pinnipèdes, siréniens, cétacés). Leurs formes analogues (on parle de « morphotypes »), en ogive, sont liées au fait que la résistance exercée par l'eau sur un corps en mouvement est minimale pour un tel profil. On parle de convergences évolutives.

Des chercheurs ont développé une théorie physique de la morphogenèse qui contribue à éclairer la nature des contraintes exercées sur la morphologie. Ils tentent d'expliquer la formation de l'embryon grâce notamment aux propriétés de la matière organique, en particulier sa fluidité. Obéissant aux lois de l'hydrodynamique, la matière organique serait contrainte, dans son développement, par un ensemble de lois physiques qui expliquent en partie ces convergences évolutives.

Si des espèces génétiquement très distantes peuvent parfois se ressembler, ce n'est pas parce qu'il existe un plan divin ou un ordre cosmique, c'est tout simplement parce que les organismes vivants, produits de la sélection naturelle, sont parfois soumis aux mêmes contraintes physiques. Reste à connaître ces contraintes sur les autres planètes habitables... ■

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

ART & SCIENCE

L'art au service de la vaccination

La Fondation Bill-et-Melinda-Gates a commandité 30 œuvres d'art pour célébrer les succès des vaccins, mais aussi alerter sur les efforts nécessaires afin que tous en bénéficient.

Loïc MANGIN

Dans sa XI[e] lettre philosophique, intitulée *Sur la petite vérole*, Voltaire raconte : « Un évêque de Worcester a depuis peu prêché à Londres l'inoculation ; il a démontré en citoyen combien cette pratique avait conservé de sujets à l'État ; il l'a recommandée en pasteur charitable. On prêcherait à Paris contre cette invention salutaire… » Le philosophe loue ainsi les avantages de ce que l'on nomme aujourd'hui la vaccination contre la petite vérole, c'est-à-dire la variole. Ce procédé consiste à préparer un organisme à une éventuelle rencontre avec un agent pathogène en lui introduisant de quoi stimuler son système immunitaire. La substance injectée, dite antigénique, est par exemple une bactérie atténuée, ou bien un fragment de virus.

Le succès de cette méthode est incontestable. Ainsi, la variole a été éradiquée en 1977 après une campagne massive de vaccination entamée en 1958. Selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS), la vaccination évite deux à trois millions de décès par an. Elle concerne de nombreuses maladies infectieuses (la diphtérie, le tétanos, la poliomyélite, la rougeole…) et quelques cancers, notamment celui du col de l'utérus.

Cependant, il reste encore beaucoup à faire. De fait, toujours selon l'OMS, un enfant sur cinq échappe encore à la vaccination. En 2013, quelque 21,8 millions de nourrissons n'ont pas été vaccinés. Les raisons sont multiples : approvisionnement en deçà des besoins, difficultés d'accès aux services de santé, manque d'informations sur la vaccination, soutien politique et financier insuffisant.

Engagée depuis janvier 2000 dans la diffusion des innovations en matière de santé, la Fondation Bill-et-Melinda-Gates a invité récemment une trentaine d'artistes (photographes, peintres, plasticiens…) de renommée internationale à se pencher sur le thème de la vaccination. C'est le projet *The Art of Saving a Life*. Les œuvres doivent rappeler les succès de la vaccination, les défis qu'elle doit encore relever, l'implication des scientifiques… Voyons quelques exemples.

Les fleurs évoquent la traduction chinoise du mot *variole*, soit *tianhua*, c'est-à-dire *fleurs célestes*.

La photographe australienne Alexia Sinclair s'est engagée dans l'aventure, notamment pour répondre aux campagnes antivaccinations qui ont cours dans son pays. Elle a composé une scène *(a, page ci-contre)* où l'on aperçoit, à gauche, une reconstitution de la première vaccination en Europe. Le 14 mai 1796, le médecin britannique Edward Jenner inocula à un garçon de huit ans, James Phipps, du pus récupéré sur une fermière infectée par la vaccine (la variole des vaches). L'enfant a été immunisé et résista à la variole humaine qu'on lui a transmise trois mois plus tard.

La femme richement vêtue, au centre du cliché, rappelle que la maladie touche toutes les classes sociales, sans distinction. Quant aux fleurs, elles évoquent la traduction chinoise du mot *variole*, soit *tianhua*. En effet, ce terme signifie *fleurs célestes*. Pour quelles raisons ? D'abord, la vaccination, ou variolisation, serait une graine de variole (une forme que l'on supposait peu virulente) semée dans le corps. Notons que la première mention indiscutable de la variolisation apparaît en Chine dès le XVI[e] siècle. Ensuite, l'apparition des pustules serait un fleurissement. Enfin, la maladie ainsi déclenchée est parfois mortelle…

On retrouve des fleurs dans l'œuvre de Vik Muniz *(b)*. Elles sont constituées de cellules hépatiques que l'infection par le virus de la variole rend rouges. Élaboré en laboratoire, le décor floral, microscopique, a été agrandi pour devenir une immense image.

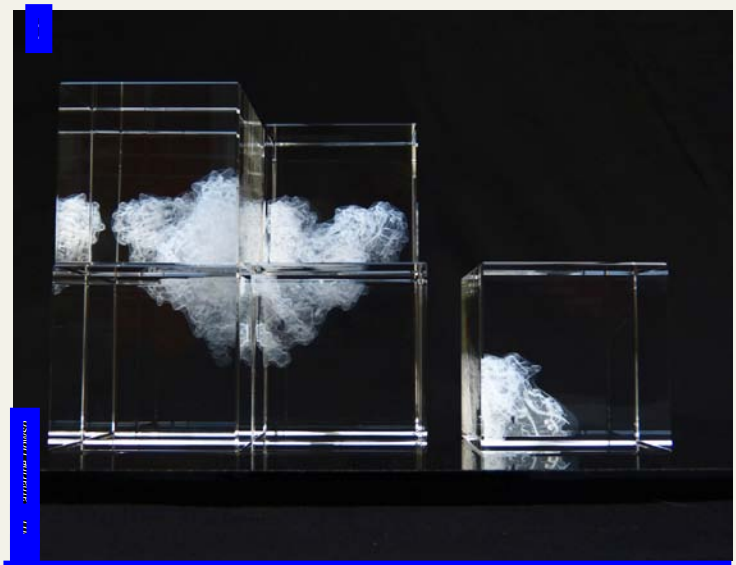
Autre exemple : la sculptrice Katharine Dowson a gravé au laser, dans huit blocs de cristal, la structure moléculaire d'un fragment de l'enveloppe du VIH *(c)* qui pourrait conduire à la conception d'un vaccin.

Parmi les artistes invités, citons Olafur Eliasson, Sebastião Salgado, Angélique Kidjo, Chimamanda Ngozi Adichie, Luc Jacquet… Où voir leurs œuvres ? En fait, elles ne sont destinées qu'à être diffusées sur internet, c'est-à-dire… viralement ! ■

Site du projet *The Art of Saving a Life* :
http://bit.ly/Gates-AOSAL

PREMIER VACCIN. ALEXIA SINCLAIR a composé une scène où l'on distingue, à gauche, le médecin Edward Jenner qui vaccine un garçon. Au centre, une femme richement parée montre que la maladie n'épargne personne ; les fleurs renvoient à l'expression *fleurs célestes*, la traduction chinoise du mot *variole*.

VARIOLE. VIK MUNIZ a créé ce motif floral avec des cellules de foie devenues rouges après une infection par le virus de la variole.



SIDA. KATHARINE DAWSON a sculpté dans du cristal la structure d'un fragment du VIH qui pourrait être utile à la conception d'un vaccin. Le découpage en huit blocs illustre la nécessaire collaboration des chercheurs

IDÉES DE PHYSIQUE

La bouteille qui chante

De quoi dépend le son produit par une bouteille ou par un ocarina ? Surtout du volume de l'instrument ou de son embouchure, mais peu de sa forme.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

L'ocarina est un étrange instrument. Constitué d'un bec court relié à un corps ovoïde percé de plusieurs trous, il fait penser à une flûte ventripotente *(voir l'illustration page 92)*. Mais on est surpris lorsqu'on essaie d'en jouer : pour changer de note, ce qui compte n'est pas tant l'emplacement des trous ouverts, comme dans une flûte, que leur nombre ou leur taille. Pourquoi ? Parce que l'ocarina n'est pas le simple tuyau à la base de la plupart des autres instruments à vent : il constitue ce que les physiciens nomment un résonateur de Helmholtz, semblable à celui formé lorsqu'on fait chanter une bouteille en soufflant sur son goulot.

LES AUTEURS

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : http://blog.idphus.fr

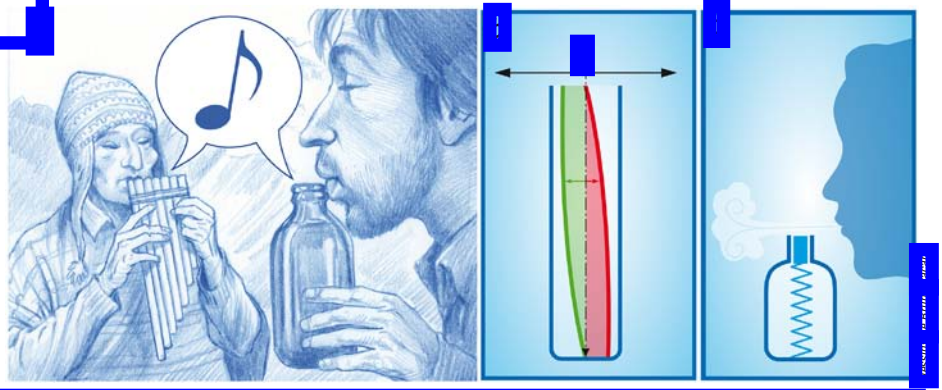
Les résonances d'un tuyau

Si l'on expérimente sur des bouteilles de différentes tailles, on constate que l'on produit des sons différents. *A priori*, nous attribuons cela à la taille de la bouteille, la pratique des instruments à vent nous ayant appris que la hauteur de la note produite dépend de la longueur du tuyau de l'instrument.

Mais un examen plus approfondi jette le doute sur cette interprétation. Deux bouteilles de même hauteur, mais de formes distinctes, peuvent produire des notes différentes et toutes deux bien plus graves que celle obtenue avec un tube parfaitement cylindrique d'une flûte de pan, de même taille.

Pour un tel tube, la théorie classique indique qu'il se forme une onde sonore stationnaire (onde dont les nœuds et les ventres d'oscillation de l'air ont des positions fixes) et que la longueur d'onde dépend de la longueur du tuyau. La longueur d'onde résonante d'un tube ouvert à une extrémité et fermé à l'autre est égale à quatre fois la longueur du tube. Ainsi, avec un tube d'un peu moins de 20 centimètres, on obtient le *la* de la tonalité d'un téléphone.

Pourquoi cela ne s'applique-t-il pas à une bouteille ? Pour le comprendre, il faut



UNE BOUTEILLE ET UN TUBE DE FLÛTE DE PAN ont des propriétés acoustiques distinctes. Ils peuvent produire la même note, même si leurs longueurs diffèrent beaucoup *(a)*. Pour un tube cylindrique fermé à l'une des extrémités, la longueur du dispositif contient un quart de longueur d'onde du son produit, avec un nœud de vibration de l'air à l'extrémité fermée et un ventre à l'extrémité ouverte *(b ; en vert et vers la gauche : l'amplitude du déplacement de l'air ; en rouge et vers la droite : l'amplitude de la surpression)*. Pour une bouteille, le son dépend de la taille relative du goulot et du volume de la partie large. Ce système peut être modélisé en première approximation comme un système masse-ressort, où la masse correspond à l'air contenu dans le goulot et le ressort à l'air contenu dans le reste de la bouteille *(c)*.

approfondir la physique des résonances. Le plus simple des résonateurs est le résonateur mécanique constitué d'une masse attachée à un ressort. Les oscillations observées correspondent à des échanges périodiques entre l'énergie cinétique de la masse et l'énergie potentielle du ressort.

Quand la masse atteint une position extrême, sa vitesse, donc son énergie cinétique, est nulle, tandis que l'allongement ou la compression du ressort, donc l'énergie potentielle, est maximale. Au contraire, lorsque la masse est à sa vitesse maximale, le ressort est détendu. Par ailleurs, la période d'oscillation est proportionnelle à la racine carrée de m/k, où m est la masse et k la « raideur » du ressort.

Il en est de même dans tous les dispositifs oscillants, qui conjuguent une composante inertielle, associée à l'énergie cinétique, et une composante élastique, associée à l'énergie potentielle. Dans les vibrations acoustiques, c'est l'air qui joue ces deux rôles : les déplacements des couches d'air fournissent l'énergie cinétique, et la pression l'énergie potentielle.

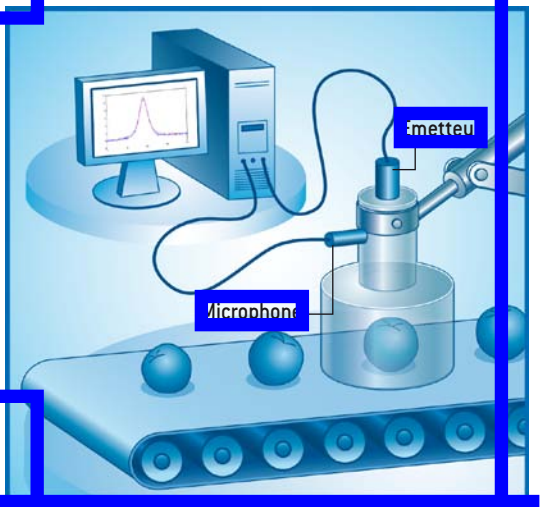
L'extrémité ouverte d'un tube cylindrique est sous pression atmosphérique ; les variations de pression y sont donc minimales, tandis que les couches d'air sont libres de se déplacer avec de fortes amplitudes. L'orifice du tuyau est donc un « nœud » d'oscillation pour la pression et un « ventre » pour la vitesse *(voir la figure page précédente)*.

À l'extrémité fermée du tuyau, c'est l'inverse. Le mouvement de l'air est bloqué par le fond, d'où un nœud pour la vitesse et un ventre pour la pression. La plus courte distance nœud-ventre correspondant à un quart de longueur d'onde, on comprend pourquoi la longueur du tuyau est le quart de la longueur d'onde de résonance acoustique.

La description qui précède fournit aussi une analogie avec le résonateur masse-ressort. Dans le tiers supérieur du tuyau, l'air vibre et se déplace en bloc. Il est peu comprimé et joue un rôle analogue à celui d'une masse qui oscille. Dans le tiers inférieur, les déplacements sont faibles et la compression est importante : l'air y joue alors le rôle de ressort. Dans la partie intermédiaire, les deux effets sont présents.

Que se passe-t-il dans une bouteille ? Le goulot change radicalement le comportement acoustique. Une onde sonore y est aussi présente, comme dans le corps de la bouteille. Mais à la frontière entre les deux régions, si la pression n'est pas affectée, le changement de diamètre modifie la vitesse des couches d'air : le débit d'air devant être le même, le rapport des vitesses à cette frontière est inversement proportionnel au rapport des sections.

Par conséquent, si l'on réduit la section de l'extrémité d'un tube d'un facteur 10, la masse d'air que contenait cette extrémité est divisée par 10, tandis que sa vitesse est multipliée par 10 (si l'on conserve la même vitesse dans la partie inférieure du tube). Conclusion : dans cette extrémité, l'énergie cinétique de l'air, égale à la moitié du produit de la masse par le carré de sa vitesse, est dix fois plus élevée. Tout se passe comme si l'on avait augmenté la masse m du résonateur masse-ressort équivalent.



MESURE ACOUSTIQUE DU VOLUME D'UN PRODUIT sur une chaîne de fabrication. La technique est fondée sur le fait que le son produit avec un récipient en forme de bouteille dépend du volume d'air contenu dans la partie large.

Le rôle du goulot : un levier de vitesses

Il s'ensuit que la présence d'un goulot augmente la période des oscillations, d'où un son plus grave par rapport à un tuyau cylindrique. Et l'effet est d'autant plus marqué que le goulot est long.

Comme le son est plus grave dans la bouteille, la longueur d'onde, qui pour un tube était égale à quatre fois sa longueur, devient très supérieure à la taille du système. En pratique, on peut donc considérer que l'amplitude des oscillations de la pression dans le corps de la bouteille est presque constante. Le corps de la bouteille joue alors le rôle de ressort, un ressort dont la raideur est d'autant plus petite que la quantité d'air est élevée : ce qui compte est le volume du corps de la bouteille, et non sa forme.

Dans le goulot en revanche, c'est l'amplitude des oscillations de la vitesse qui

BIBLIOGRAPHIE

M. P. Silverman et E. R. Worthy, **Musical mastery of a Coke™ bottle : Physical modeling by analogy**, *The Physics Teacher*, vol. 36, pp. 70-74, 1998.

S. R. Smith et P. D. Loly, **The great beer bottle experiment**, *Amer. J. of Physics*, vol. 47, pp. 515-518, 1979.

A. Cummings, **Acoustics of a wine bottle**, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 31, pp. 331-343, 1973.

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

CONTRAIREMENT À UNE FLÛTE, L'OCARINA produit un son qui ne dépend pas de la position des trous non obturés. Seule compte la superficie totale représentée par ces trous.

est uniforme. L'air qu'il contient joue alors uniquement le rôle de masse. L'expérience e confirme : des bouteilles de formes et diamètres divers, mais de même volume, produisent le même son. Il faut toutefois que les goulots soient identiques, car l'air du goulot intervient dans la hauteur du son par sa masse et par la surface de contact avec l'intérieur de la bouteille. Pour fixer es idées, avec une bouteille de un litre et un goulot de 22 millimètres de diamètre et long de trois centimètres, on obtient un son de fréquence inférieure à 200 hertz environ (un *sol* grave).

Nous sommes maintenant en mesure de comprendre l'ocarina, un résonateur de Helmholtz muni d'une embouchure de flûte. Ce récipient ventru en bois ou en céramique est percé de plusieurs trous qu'on bouche avec les doigts. En les débouchant successivement, on modifie la hauteur du son produit, avec des doigtés qui peuvent être analogues, par commodité, à ceux d'une flûte.

On s'aperçoit toutefois assez vite que ce qui compte vraiment dans un ocarina est la surface totale libérée, et pas tant la position des trous ouverts : à mesure que l'on débouche les trous, c'est autant de petits goulots que l'on crée. Comme ce qui se passe dans le volume est uniforme, on obtient le même effet qu'avec un goulot unique, mais de section équivalente.

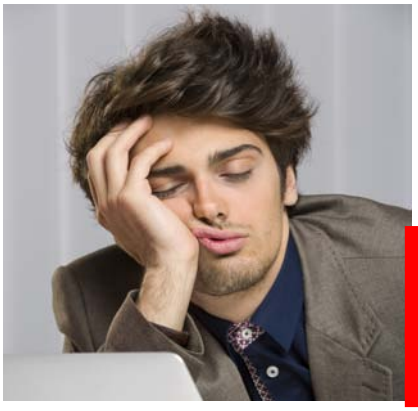
Evidemment, avec seulement dix doigts, il est difficile d'obtenir sur un ocarina un large registre de notes... à moins d'opter pour un ocarina multichambres. Ces derniers sont munis de deux, trois, voire quatre embouchures par lesquelles vous pouvez souffler et jouer ainsi un plus grand nombre de notes, au prix d'une difficulté accrue. ■

QUESTION AUX EXPERTS

Combien de temps peut-on tenir sans dormir ?

L'organisme supporte de veiller plusieurs jours sans dommages à long terme.

Marie-Françoise VECCHIERINI



En 1965, Randy Gardner, un étudiant américain de 17 ans, a passé 264 heures (11 jours et 11 nuits) sans dormir. C'est, aujourd'hui encore, la plus longue privation de sommeil enregistrée. William Dement, de l'Université Stanford, a vérifié l'absence d'endormissement en enregistrant l'activité du cerveau.

Peut-on aller encore plus loin ? À la fin de sa longue veille, l'étudiant était plus instable, plus agressif et peinait à se concentrer. Ses gestes étaient moins précis, ses paroles moins fluides, ses réactions plus lentes. Il avait aussi quelques hallucinations visuelles. Mais ce n'était pas un zombi pour autant ! Il a d'ailleurs pu tenir une conférence de presse et jouer au basket.

On a étudié la privation totale de sommeil pendant quelques jours dans d'autres expériences – la plus ancienne remonte à 1896. Il a aussi été constaté une apparition progressive de ces symptômes, les hallucinations survenant en dernier. À mesure que la veille s'allonge, certains sujets semblent adhérer à ces hallucinations et perdre leur esprit critique.

Selon des rumeurs circulant sur Internet, la privation de sommeil pourrait avoir des conséquences encore plus graves. Un disc-jockey aurait eu des hallucinations et des délires paranoïaques après avoir passé plus de huit jours sans dormir. En 2012, un Chinois serait mort à la suite d'une veille de trois jours, rivé à la Coupe du monde de football à la télévision. Mais ces deux cas sont sans doute dus à la consommation de substances psychotropes, telles que l'alcool ou les amphétamines, plus qu'à la privation de sommeil.

Une trop longue privation de sommeil peut-elle alors se révéler fatale et si oui, en combien de temps ? Difficile de savoir, puisque pour des raisons éthiques évidentes, il est impossible de réaliser l'expérience ! Les études menées sur des animaux pour préciser les conséquences de la privation de sommeil donnent quelques indices, mais ne permettent pas d'extrapoler à l'homme, car les résultats varient selon les espèces. Les poussins meurent en quatre à six jours, les rats en 21 à 30 jours. Leur température interne baisse notablement et des troubles immunitaires finissent par les tuer. En revanche, les chats semblent s'endormir avant que les conséquences ne soient fatales, même lorsqu'ils reçoivent des stimulations sonores ou lumineuses intenses et prolongées.

Une insomnie de quatre mois !

Chez l'homme, plusieurs pathologies entraînent des insomnies sévères et se soldent par la mort du patient. C'est le cas dans l'insomnie fatale familiale, et parfois dans l'encéphalite léthargique et la chorée fibrillaire de Morvan. Concernant cette dernière pathologie, un patient est resté quatre mois presque sans dormir. De brèves phases de sommeil persistaient tout de même, conduisant ce sujet à s'assoupir quelques dizaines de minutes au total dans la journée. En outre, les dysfonctionnements liés à ces maladies sont tels qu'on ne peut attribuer la mort aux seules insomnies.

En l'absence de pathologie, la durée de veille supportable dépend probablement des individus. En outre, le système immunitaire semble tout de même affecté par le manque de sommeil. Plusieurs expériences l'ont montré dans le cas d'insuffisances chroniques. Une analyse sanguine a également révélé une réaction inflammatoire chez un volontaire resté éveillé pendant trois jours.

Faut-il alors s'inquiéter après une ou deux nuits blanches ? Vous ne serez en tout cas plus très performant au travail. À la fin des années 1990, une expérience sur des étudiants volontaires a montré qu'au-dessous de cinq heures de sommeil, l'efficacité baisse notablement. En revanche, il n'y a pas lieu de s'inquiéter d'éventuels effets à long terme. Dans toutes les expériences sur l'homme, les marques d'une longue veille disparaissent rapidement. Précisons tout de même que ces expériences, réalisées par des volontaires, manquent souvent de rigueur ou de contrôle scientifique, et que la privation chronique de sommeil reste néfaste. Quant à Randy Gardner, il aurait récupéré après une seule bonne nuit de... 14 heures et 40 minutes ! ■

Marie-Françoise VECCHIERINI est praticien hospitalier au Centre du sommeil, à l'Hôtel-Dieu de Paris

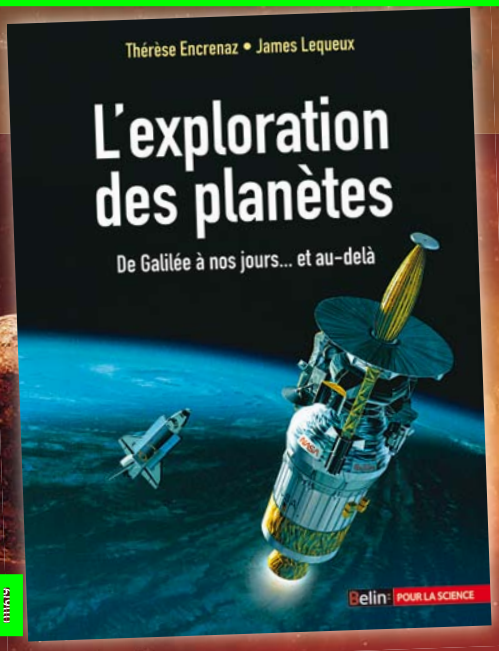
OFFRE INTÉGRALE

POUR LA SCIENCE

8€/mois seulement !

Le magazine ***Pour la Science*** tous les mois
+ 4 hors-séries ***Dossier Pour la Science*** par an
+ **l'accès numérique illimité** aux archives depuis 1996 sur www.pourlascience.fr*

Plus de 42 % de réduction sur le prix de vente à l'unité



+Votre cadeau de bienvenue

L'exploration des planètes : de Galilée à nos jours... et au-delà
de James Lequeux et Thérèse Encrenaz

Il y a quatre siècles, Galilée braquait une lunette vers le ciel et y découvrait les montagnes de la Lune et les satellites de Jupiter... Pour la première fois, l'Homme contemplait la voûte céleste autrement qu'à l'œil nu ! Depuis cette époque, l'astronomie a fait des progrès vertigineux. En partant du geste fondateur de Galilée, ce livre abondamment illustré retrace l'histoire des avancées et des échecs qui ont jalonné la conquête du Système solaire.

Éditions Belin 2014 (valeur 23€)

Conditions complètes de l'offre sur www.pourlascience.fr

BULLETIN D'ABONNEMENT

POUR LA SCIENCE

Abonnements – Libre réponse 90 382 – 75 281 Paris cedex 06

1. MA FORMULE

❑ **OUI, je m'abonne à l'offre « Intégrale » à 8€ par mois.** Je reçois **le magazine *Pour la Science*** (12 nos/an) **+ son hors-série *Dossier Pour la Science*** (4 nos/an) **+ mon livre offert.** Je bénéficie aussi de l'accès numérique illimité aux archives sur **www.pourlascience.fr.**

Mon e-mail obligatoire pour l'accès aux contenus numériques (à remplir en majuscules)

Mon CADEAU de bienvenue

Réception de votre numéro : comptez 3 semaines pour recevoir votre n° d'abonné. Passé ce délai, merci d'en faire la demande à abonnement@pourlascience.fr

2. MES COORDONNÉES

Nom : Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville : Pays : Tél. : (facultatif)

3. MON MODE DE RÈGLEMENT

❑ Je règle par prélèvement **8€ par mois*** **et reçois en cadeau le livre *L'exploration des planètes*** (réf. 00EXP)

Je remplis l'autorisation ci-dessous en joignant impérativement un IBAN/BIC.

*Pour la France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'Europe (pays de la zone SEPA) : 9,33€ par mois. Abonnement en reconduction tacite dénonçable à tout moment auprès du service abonnement. Conditions complètes sur www.pourlascience.fr

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 des recettes de mon bulletin de [illegible] mentionné ci-dessus. Je bénéficierai d'un délai de 14 jours minimum à compter de la date de débit de mon compte pour contester le prélèvement auprès de mon établissement bancaire.

1 - COORDONNÉES DU TITULAIRE DU COMPTE

Nom, prénom

Adresse

Code postal Ville Pays

2 - COORDONNÉES BANCAIRES

IBAN (Numéro d'identification international de votre compte – Ne pas oublier les lettres)

BIC (Code international d'identification de votre banque – Ne pas oublier les lettres)

3 - Date et signature obligatoires

À

Date

Signature :

NOM DU CRÉANCIER **ICS N°** FR92ZZZ426900

Pour la Science – 8 rue Férou – 75006 Paris

N° de référence unique de mandat (RUM)

Cadre réservé au service abonnement – Ne rien inscrire

Type de paiement : Paiement récurrent/répétitif

❑ Je préfère régler mon abonnement d'un an en **une seule fois 96€**** **sans bénéficier du cadeau**

** Offre valable en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, par tarification aux frais de port à ajouter : Europe 16€ – autres pays 35€

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

❑ Par carte bancaire N°

Date d'expiration Clé

Signature obligatoire

OFFRE N° ILS449B

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 ❑

SCIENCE & GASTRONOMIE

Un metchnikoff de fraises

L'ajout de protéines à un liquide permet de réaliser de nouvelles préparations culinaires, selon la méthode utilisée pour faire coaguler les protéines.

Hervé THIS

La consommation accrue de viande dans des pays tels que l'Inde ou la Chine nous obligera sans doute à manger davantage de protéines végétales. Certes nous pourrons consommer plus de lentilles, par exemple, mais imaginons une organisation où nous achèterions des sacs de protéines (en poudre, en flocons...). Comment cuisinerons-nous ces dernières ?

Réjouissons-nous que le piano du cuisinier s'enrichisse de nouvelles touches, avec lesquelles on pourra jouer une nouvelle musique. Et ne nous inquiétons pas, car il n'y aura pas de difficulté : nous avons déjà en cuisine de la gélatine (en poudre ou en feuille), tandis que les pâtissiers utilisent couramment de la poudre de blanc d'œuf.

À ces deux matières s'ajoutent à présent des protéines laitières et des protéines végétales. Comment les utiliser ? Les protéines sont des chaînes moléculaires dont les maillons sont des résidus d'acides aminés. Et ces chaînes ont des comportements qui diffèrent selon au moins deux caractéristiques : l'hydrophobie ou l'hydrophilie des résidus d'acides aminés, et la présence de groupes latéraux thiols (un atome de soufre lié à un atome d'hydrogène), lesquels peuvent former des liaisons nommées ponts disulfures.

Certaines protéines, telles les gélatines de bœuf, de porc, de volaille, de poisson), se dissolvent dans l'eau chaude ; et quand la température diminue, elles forment un gel si elles sont en quantité suffisante (environ 5 grammes pour 100 grammes d'eau). Ce gel, comme celui des aspics ou des bavarois, se défait quand on chauffe, et se refait quand on refroidit. Pour d'autres protéines, telles les protéines du blanc d'œuf, c'est quand on les chauffe avec de l'eau qu'une « coagulation » se produit.

Un retrouve ces comportements avec les protéines végétales. Par exemple, certaines protéines de pois présentent une thermocoagulation. D'autres sont à l'image des protéines du lait qui forment, lors du chauffage, une peau coagulée... et responsable de débordements domestiques.

Il y a aussi les caséines, que les confectionneurs de yaourts ou de fromages savent faire coaguler. On peut se contenter de les faire précipiter, comme quand on met le jus d'un citron dans du lait bouillant, mais on peut aussi les faire coaguler en ajoutant des micro-organismes (des « ferments ») qui acidifient le milieu, ou en utilisant un composé tel que la glucono-delta-lactone. Une autre coagulation s'obtient avec de la présure, où une enzyme modifie la surface des agrégats de caséine, ce qui les déstructure (cas de fromages). Dans chaque cas, on obtient des gels aux propriétés (couleur, opacité, dureté) différentes.

Cela étant, dans la plupart des aliments classiques, on part d'un liquide qui contient les protéines, puis on fait coaguler. Maintenant que nous avons des protéines pures et que nous pouvons les ajouter au liquide que nous voulons, pourquoi ne pas faire gélifier, avec des gels sur mesure, des produits sur mesure ?

Prenons par exemple un jus de fraise. Ajoutons des caséines : l'ajout de glucono-delta-lactone ou de ferments de yaourt (il faudra aussi ajouter du lactose) permet de faire un yaourt de fraise, et non plus un yaourt à la fraise !

En réalité, le produit ne sera pas un yaourt, puisque les règles stipulent qu'un yaourt s'obtient par gélification du lait par deux micro-organismes spécifiques. Il faut donc un nouveau nom. Elie Metchnikoff (1845-1916), biologiste de l'Institut Pasteur, ayant beaucoup étudié ces questions, je propose de nommer le produit un « metchnikoff de fraises ». On pourrait aussi faire un metchnikoff de poivre, de réglisse, de ginseng.

Poursuivons sur notre lancée. Il n'est pas difficile de faire une sorte de « fromage » de fraise, mais, cette fois, utilisons de la présure, que nous ajouterons à un jus de fraise supplémenté de protéines laitières. Le produit obtenu ne sera pas du fromage, mais un système pour lequel il faut un nom. Cette fois, je propose de retenir le nom du docteur Roux, autre grand biologiste élève de Louis Pasteur ! ■

Hervé THIS, physico-chimiste, est directeur du Centre international de gastronomie moléculaire AgroParisTech-Inra et directeur scientifique de la Fondation Science & culture alimentaire (Académie des sciences).

Retrouvez la rubrique Science & gastronomie sur www.pourlascience.fr

ASTRONOMIE

La Terre ne tourne pas rond

Xavier Campi

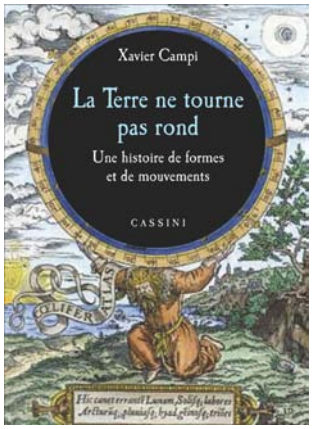
Cassini, 2014
(320 pages, 20 euros)

L'astronomie a, pendant des siècles, été restreinte à l'observation de l'espace depuis la surface de la Terre. Ce point de vue terrestre apporte un certain nombre de complications, car le mouvement de la Terre est relativement complexe : notre planète tourne non seulement sur elle-même, mais aussi autour d'un axe dont la direction évolue elle-même au cours du temps, comme l'axe d'une toupie. C'est d'ailleurs en partie l'observation astronomique qui a permis de s'apercevoir de la complexité de ce mouvement. Dans le présent ouvrage, Xavier Campi explore cette relation intime entre l'astronomie et le mouvement de la Terre ; plus généralement, il nous présente une captivante histoire des idées en mécanique.

Comme l'indique le sous-titre, le fil rouge est la forme de la Terre. En effet, celle-ci intervient à plusieurs moments clés de l'histoire de la mécanique. D'une part, cette forme est déterminée par la gravitation : l'auteur nous ramène notamment au XVIII[e] siècle, quand la querelle entre les cartésiens et les newtoniens (les premiers expliquaient la gravitation avec une théorie des tourbillons, les seconds avec une interaction à distance) a culminé avec la prédiction expérimentale liée à l'aplatissement de la Terre : équateur resserré pour les uns, pôles aplatis pour les autres. Le rôle des mesures géodésiques est décrit de façon passionnante, et l'on voit combien les idées peuvent résister longtemps à l'épreuve de faits expérimentaux qui les contredisent… Par ailleurs, la forme de notre planète détermine la façon dont elle tourne sur elle-même, et donc le mouvement apparent du ciel des astronomes, comme a permis de le comprendre la mécanique de Newton.

Une fois acceptée par l'ensemble des savants de l'époque, cette mécanique permit d'affiner l'étude du mouvement des planètes autour du Soleil et de mieux comprendre les observations astronomiques. En retour, cela a amélioré la compréhension de la mécanique et de la gravitation, et a notamment joué un rôle dans la mise à l'épreuve expérimentale de la relativité générale, au début du XX[e] siècle.

Richard Taillet
Université de Savoie



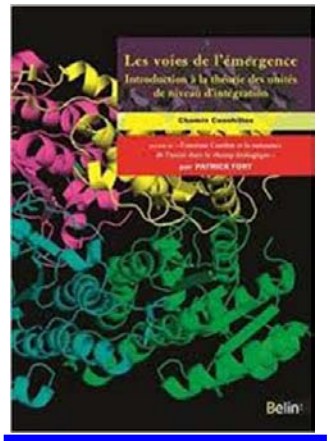
BIOLOGIE

Les voies de l'émergence

Chomin Cunchillos

Belin, 2014
(320 pages, 35 euros)

Dans une époque où la biologie cède toujours plus aux sirènes de la technique, ce livre, sous-titré « Introduction à la théorie des unités de niveau d'intégration », brille d'un éclat singulier. Revigorant pas de côté, il résulte d'un effort rare – et même inédit ! – pour poser les bases d'une théorie unifiée du vivant. Biologiste de l'Université autonome de Madrid, l'auteur y poursuit l'œuvre du biochimiste espagnol Faustino Cordón. Cet ouvrage est la première grande synthèse approfondie en français de sa théorie des unités de niveau d'intégration.



Cette thèse émergentiste ne se laisse pas facilement résumer : son idée centrale est que les organismes vivants sont non seulement des entités issues de niveaux emboîtés, mais qu'en outre, ils acquièrent leur caractère particulier d'unité, voire de conscience, par une intégration des effets de leurs éléments constitutifs.

Ainsi s'opère une distinction conceptuelle, à chaque niveau du vivant, entre l'organisme (par exemple un animal) et son soma (ici, les cellules) : l'entité matérielle est la même dans les deux cas, mais seul l'organisme possède une dimension unitaire qui traduit de manière objective, selon l'auteur, ce qu'être vivant veut dire. Cela le conduit à des conclusions détonantes, faisant notamment des protéines des entités vivantes, mais refusant le statut d'organismes aux végétaux : laissons ici au lecteur le plaisir de découvrir sa logique ! Elle a, en tout cas, une cohérence interne indéniable. Il en découle un traité ambitieux et souvent déroutant, ce qui, après tout, est aussi une qualité, puisqu'il repose ici sur une argumentation élaborée.

Une théorie détaillée sur l'apparition de la vie et de l'organisation cellulaire y est proposée, à rebours de bien des propositions actuelles : on y découvrira des hypothèses audacieuses, comme celle d'un monde prébiotique où les protéines auraient proliféré sans gènes, et hors de tout contexte cellulaire, ou celle d'une apparition endogène des mitochondries dans les cellules eucaryotes (dotées d'un noyau).

L'ADN et l'ARN, si souvent mis au centre des processus fondamentaux du vivant, ne sont mentionnés presque que subrepticement. Ces idées seront, à n'en point douter, âprement débattues, mais elles ont au moins l'immense mérite, entre autres, de penser certains angles morts des thèses dominantes et de nous rappeler que l'unité du vivant, 150 ans après Darwin, est paradoxalement à la fois une évidence et une quête.

Thomas Heams
AgroParisTech, Paris

ÉCONOMIE-ÉNERGIE

Déchiffrer l'énergie

Benjamin Dessus

Belin, 2014
(384 pages, 29,90 euros)

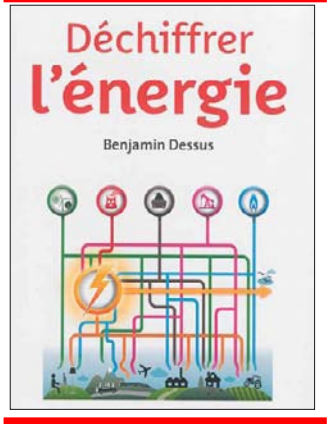
L'auteur s'est attelé à la tâche de « déchiffrer » les signaux que les systèmes énergétiques envoient à la société. Dans cette approche originale, il s'intéresse à la fois à l'offre et à la demande d'énergie dans toutes leurs composantes sociales et économiques : se déplacer, produire, etc. Il procède en quatre étapes avec de larges coups de projecteur sur :

- les besoins d'un pays, par exemple la France
- les grandes filières

- l'économie des systèmes énergétiques
- la prospective pour une transition énergétique.

Dans la première partie, il montre les énormes disparités de consommation dans le monde. Comparant les bilans électriques de la France et de l'Allemagne, il relativise l'indépendance énergétique de notre pays, puisqu'elle repose sur une industrie électronucléaire fonctionnant avec de l'uranium importé.

Pour déchiffrer l'offre d'énergie, il passe en revue les filières énergétiques avec leurs caractéristiques contrastées. Il montre que le stockage de l'énergie est une question clé, notamment pour l'électricité, car il commande le développement des énergies renouvelables intermittentes telles que le solaire et l'éolien. La gestion des systèmes énergétiques est guidée par des considérations économiques et il faut saluer l'exercice auquel se livre



Benjamin Dessus, qui compare très clairement, exemples à l'appui, le coût des filières dans une jungle de taux d'actualisation, de taxes et de réglementations.

Sa réflexion finale sur la prospective de l'énergie le conduit, à partir d'une utile « rétrospective » des scénarios énergétiques, à expliquer l'émergence du concept de transition énergétique : un avenir sans énergies fossiles pour limiter le réchauffement climatique. Toutefois, elle devrait être complétée par une prospective de ses enjeux scientifiques. On lira avec intérêt ce livre, qui contribue à éclairer le débat sur l'énergie et les progrès à faire pour mieux l'employer.

Pierre Papon
ESCPI, Paris

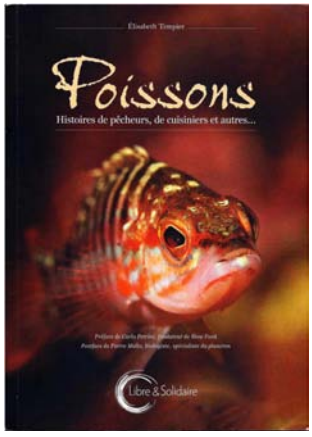
SOCIO-ÉCONOMIE

Poissons Histoires de pêcheurs, de cuisiniers et autres...

Élisabeth Tempier
Libre & Solidaire, 2014
(276 pages, 29,90 euros).

Économiste de formation et passionnée par la vie de nos littoraux, l'auteure porte un regard attentif d'anthropologue sur la vie du monde de la pêche artisanale. C'est avec le souci de préserver l'aspect culturel et écologique des activités de la mer qu'elle nous livre ce document, plein de sensibilité.

Simple consommateur, gourmet, scientifique, pêcheur amateur ou citoyen soucieux de la ressource maritime, chacun pourra se plonger avec délice dans ces pages bien documentées et à la riche iconographie. Préfacé par Carlo Petrini, fondateur du mouvement d'écogastronomie *Slow Food*, le livre est organisé en six chapitres (nature, savoir-faire, métiers, organisations professionnelles, territoire et environnement) contenant des réflexions sur les techniques, les lieux de pêche, mais aussi sur la biologie marine et littorale, le plancton, les différentes activités concurrentielles telles



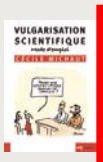
que l'exploitation des granulats marins, l'aquaculture intensive ou la cohabitation avec les activités touristiques. Sont également abordés les aspects environnementaux.

Inventaire à la Prévert ? Non, car ce balayage éclectique s'organise harmonieusement, tandis que chacun des aspects abordés est illustré par la description d'un poisson connu ou moins connu, accompagné d'une recette. Ainsi, de page en page, l'ensemble des poissons de notre littoral est recensé parallèlement aux très nombreux problèmes posés à la pêche artisanale, à sa survie, à son adaptation à l'économie moderne, aux pressions environnementales et à la concurrence des activités industrielles aggravée par la mondialisation des échanges.

La lecture de cet ouvrage suscite un sentiment d'admiration pour des métiers largement méconnus et des hommes passionnants et passionnés, maillons indispensables de la chaîne alimentaire marine dont l'intérêt n'est plus à démontrer.

Bernard Schmitt
CERN

Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur www.pourlascience.fr



Vulgarisation scientifique, mode d'emploi

Cécile Michaut
EDP-Sciences, 2014
(160 pages, 16 euros).

Fruit d'une bonne expérience, ce manuel est agréablement présenté sans le prêchi-prêcha coutumier d'auteurs prétendant remettre les lecteurs sur les bancs de l'école. La vulgarisation scientifique a pour but d'inciter les lecteurs à réfléchir ; toutefois, pour ce faire, il faut expliquer le sujet de la réflexion avec une brièveté imposée par la patience du lecteur. L'auteure nous fait bien sentir à quel point l'art du vulgarisateur tient à cet équilibre. Son propos traduit une vision personnelle – discutable sur certains points – mais qui engage une intéressante réflexion.

Dolmens et menhirs

Frédéric Lontcho
L'Archéologue, 2014
(190 pages, 12,50 euros).

Le mégalithisme est l'une des manifestations complexes du Néolithique européen. Qui en a la vision d'ensemble et les photos qui vont avec ? L'auteur, qui est aussi le rédacteur en chef de *L'Archéologue*, notre confrère spécialisé en archéologie. Dans une série de belles photographies personnelles, il donne ici à voir les dolmens et les menhirs des îles britanniques, d'Ibérie, de France, du Benelux, d'Allemagne, du Danemark et de Suède, le tout accompagné des textes pertinents et accessibles d'un grand habitué des archéologues et de leur pensée.

Cosmicomic

Amedeo Balbi et Rossano Piccioni (dessins)
Nouveau Monde, 2015
(152 pages, 18 euros).

Les cosmologistes du XXe siècle se retrouvent dans cette bande dessinée pour raconter la naissance du modèle du Big Bang. Astrophysicien, l'auteur met habilement en scène – par la fiction parfois – les chercheurs qui ont bouleversé notre vision du cosmos. Les concepts essentiels concourant au modèle du Big Bang sont expliqués de façon pédagogique et parfaitement intégrés dans l'histoire. La recherche, avec ses erreurs, ses impasses et ses succès, est narrée avec enthousiasme des découvreurs.

EXERCICES PLURIDISCIPLINAIRES

Pour ne pas se laisser enfermer dans une spécialité, il faut s'astreindre à des exercices variés. En voici.

Logique. Expliciter la notion de réciproque, telle qu'elle découle de l'extrait suivant : « Dans un immeuble d'habitation, le plancher de l'appartement au-dessus est plafond pour l'appartement au-dessous et réciproquement » (Claude Lévi-Strauss, *La potière jalouse*, ch. IX, Pléiade, 2008, p. 1153).

Linguistique. Dans combien de langues le jeu de mots « Tu es Pierre, et sur cette pierre je bâtirai ma maison » est-il traduisible ? Peut-on faire un jeu de mots traduisible dans un nombre de langues encore plus grand ? Inversement, fabriquer un jeu de mots qui ne puisse être fait dans aucune langue.

Sociologie. Expliquer la corrélation découverte par Tolstoï : « Il y a deux sortes d'hommes : ceux qui chassent et ceux qui ne chassent pas. Ceux qui ne chassent pas aiment les petits enfants, les bébés, et peuvent les prendre dans leurs bras ; les chasseurs éprouvent un sentiment de terreur, de dégoût et de pitié devant les bébés. Je ne connais pas d'exception à cette règle » (lettre à Alexandra Tolstoï, automne 1872, citée en note dans *Anna Karénine*, Pléiade, 2010, p. 1605).

Agilité intellectuelle. Énoncer une hypothèse H quelconque. Énoncer une conclusion C quelconque. Puis démontrer que C découle de H.

Métaphysique. Dans les grottes ornées, « la discordance entre animaux chassés et animaux figurés est trop constante pour résulter d'un hasard fortuit » (Jean Clottes, *Pourquoi l'art préhistorique ?*, ch. I, Folio Essais, 2011, p. 29). Élaborer le concept de hasard non fortuit. S'applique-t-il à d'autres domaines que la préhistoire ?

Art de la chicane. Votre train, parti avec un retard de 20 minutes, est arrivé avec un retard de 15 minutes, soit un retard cumulé de 20 + 15 = 35 minutes. Convaincre la SNCF qu'elle vous doit un dédommagement.

Mathématiques. Imaginer Cédric Villani à la boule à zéro, vêtu d'un pull et d'un jean informes.

LA RÉVOLUTION FRIVOLE

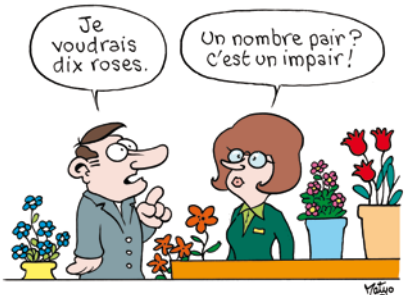
Des problèmes qui auraient naguère été considérés comme des amusettes tout juste bonnes à distraire des ingénieurs à la retraite retiennent aujourd'hui l'attention de mathématiciens ou physiciens professionnels. On écrit l'histoire des vêtements, des jouets et autres objets qui, il y a peu, semblaient si frivoles que les historiens n'auraient jamais songé à s'arrêter dessus.

La frivolité, justement, il se trouve désormais des philosophes pour la défendre, et pour réfléchir à la mode, à la superficialité ou au maquillage.

La cité intellectuelle est moins fascinée qu'autrefois par les perspectives impossantes. Les sujets humbles prennent leur revanche sur les sujets nobles. Est-ce un signe avant-coureur d'une révolution dans la cité en général ?

LES IMPAIRS DE LA PARITÉ

« Les Japonais préfèrent les nombres impairs, les Occidentaux préfèrent les nombres pairs ». Enfermer les peuples dans des particularités est souvent discutable, mais le propos ci-dessus est dû à



un Japonais écrivant en anglais. Accordons lui donc *a priori* une double compétence.

En français, en allemand, en italien, en espagnol, la notion de base est la parité : un nombre est pair ou non. Pour les Anglais, un nombre impair est bizarre *(odd number)* ; les Français craignent de commettre des impairs. Au Japon, ce sont les nombres pairs qui sont mal connotés. Deux évoque la séparation, quatre est homonyme de mort, six apparaît dans une expression signifiant « bon à rien ». Les offrandes peuvent être de 10 000 ou 30 000 yens, pas 20 000. Dans un texte non scientifique japonais, les nombres les plus fréquents sont un et trois ; dans un texte anglais, c'est deux. Le Japon associe les nombres impairs au yang, considéré comme bon et supérieur, et les nombres pairs au yin, considéré comme mauvais et inférieur.

Le rejet des nombres pairs peut expliquer pourquoi le Japon peine à établir un système politique fondé sur deux partis principaux. L'auteur regrette cela. Pourtant, en Occident, nous sommes loin d'être toujours satisfaits d'un tel système. Le système idéal est-il celui où le nombre de partis principaux n'est ni pair ni impair ? (D'après Yutaka Nishiyama, « Odd and even number cultures », *Int. Journal of Pure and Applied Math.*, vol. 82(5), pp. 719-729, 2013.)

Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal 5636 – Mars 2015 – N° d'édition M0220449-01 – Commission paritaire n° 0912 K 82029 – Distribution : Presstalis – ISSN 0 153-4092 – N° d'imprimeur 101/195 223 – Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé

OBSERVEZ LA GRANDE ÉCLIPSE PARTIELLE DE SOLEIL EN TOUTE SÉCURITÉ

AVEC LES LUNETTES « SPÉCIALES ÉCLIPSE » !

le 20 mars 2015 à 11h 17m

3 €

(Tarif dégressif selon quantité)

Lunettes de protection certifiées CE pour regarder le Soleil à l'œil nu en toute sécurité. Equipées de filtres en polymère teinté dans la masse et haute protection (transmission 1/100000 ème, densité 5), ces lunettes sont parfaites pour regarder les éclipses solaires, passages de planètes devant le disque solaire, ou taches solaires de tailles importantes...

Prix dégressif par lots: 1x - 5x - 10x - 50x - 100x - 500x et 1000x (pour d'autres quantités, consultez-nous).

Caractéristiques:

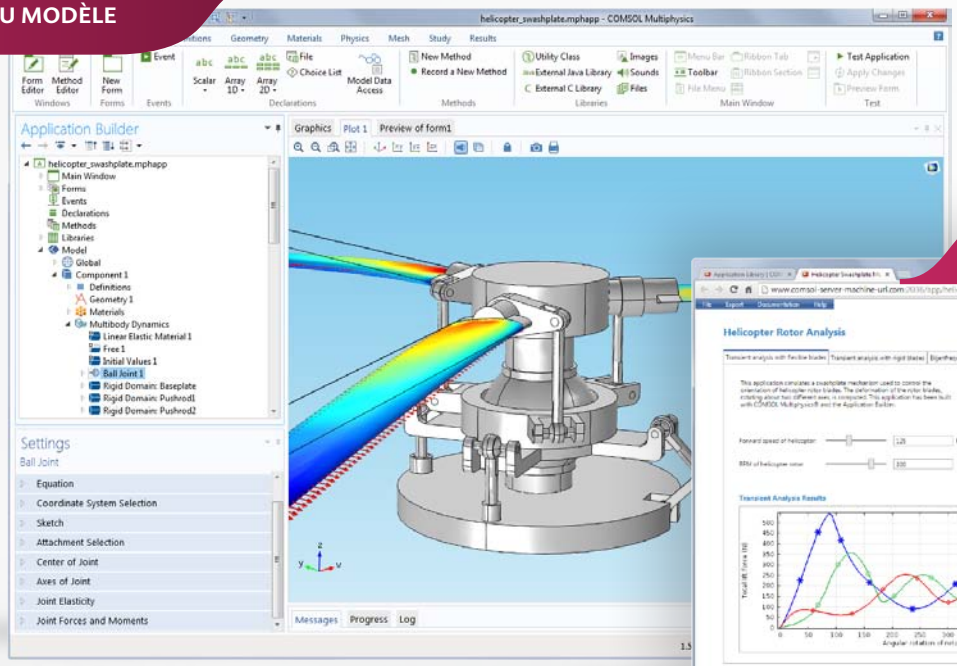
- Lunettes répondant aux Normes C.E.
- Filtres en polymère teinté dans la masse
- Carton extra, panneau sandwich

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

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

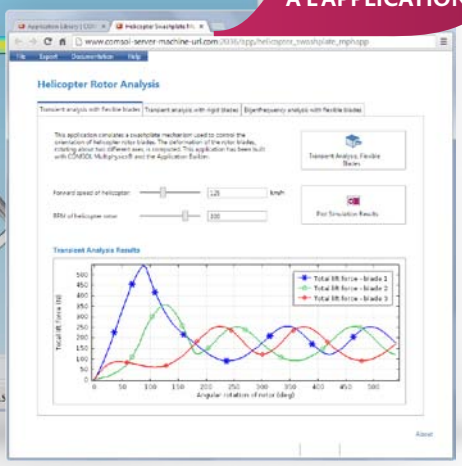
33 et 35, rue de Rivoli, 75004 Paris
Tel. : 01 42 77 99 55
nfo@maison-astronomie.com
oraires d'ouverture :
du mardi au samedi de 10h15 à 18h30

DU MODÈLE



COMSOL MULTIPHYSICS®

À L'APPLICATION



COMSOL SERVER™

Testez et Optimisez vos designs avec COMSOL Multiphysics®

NOUVEAUTÉS : APPLICATION BUILDER ET COMSOL SERVER™

L'Application Builder vous permet de créer facilement des interfaces métiers à partir de vos modèles multiphysiques. COMSOL Server™ vous permet de distribuer vos applications à vos collègues et à vos clients partout dans le monde.

Visitez comsol.fr/release/5.0

Product Suite

› COMSOL Multiphysics®
› COMSOL Server™

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

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

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

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

MULTIPURPOSE
› Optimization Module
› Material Library
› Particle Tracing Module

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

© Copyright 2014-2015 COMSOL. COMSOL, COMSOL Multiphysics, Capture the Concept, COMSOL Desktop, COMSOL Server and LiveLink and are either registered trademarks or trademarks of COMSOL AB. All other trademarks are the property of their respective owners, and COMSOL AB and its subsidiaries and products are not affiliated with, endorsed by, sponsored by, or supported by those trademark owners. For a list of such trademark owners, see www.comsol.com/trademarks

COMSOL