HISTOIRE DES SCIENCES
Winston Churchill et les extraterrestres

NEUROSCIENCES
Des minicerveaux fabriqués *in vitro*

ASTROPHYSIQUE
Les supernovæ de l'extrême

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

Avril 2017 - n° 474

www.pour[illegible]e.fr

Guerre de TROIE



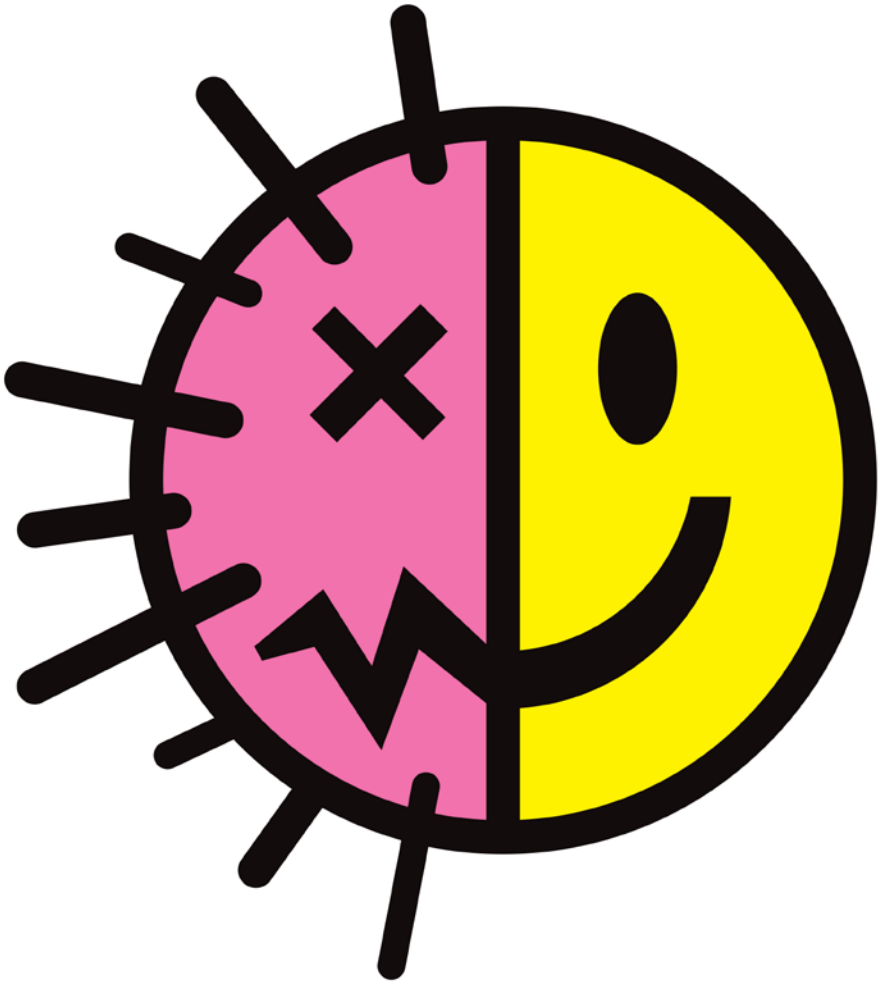
Le mythe à l'épreuve de l'archéologie

M 02687 - 474S - F: 6,50 € - RD

BEL : 7,2 € - CAN : 10,95 $ CAD - DOM/S : 7,3 € - Réunion/A : 9,3 € - ESP : 7,2 €
Gr : 7,2 € - ITA : 7,2 € - LUX : 7,2 € - MAR : 60 MAD - TOM : 980 XPF
PORT.CONT. : 7,2 € - CH : 12 CHF - TUN/S : 8,6 TND

#Cviral

80 ans
Palais



FINDUEUR IN ZENDSE

Du microbe au fou rire, tout s'attrape

VIRAL

Exposition > 18.10.16 > 27.08.17

Ⓜ Champs-Élysées Clemenceau Ⓜ Franklin Roosevelt

Palais DÉCOUVERTE

EN CO-PRODUCTION AVEC

PAVILHÃO DO CONHECIMENTO CIÊNCIA VIVA

HEUREKA

EN PARTENARIAT AVEC

Direct Matin · Science et Vie · Télérama · Society · So Foot · franceinfo:

POUR LA SCIENCE

www.pourlascience.fr

162 rue du Faubourg Saint-Denis
75010 Paris – Tél : 01 55 42 84 00

Groupe POUR LA SCIENCE
Directrice des rédactions : Cécile Lestienne

Pour la Science
Rédacteur en chef : Maurice Mashaal
Rédactrice en chef adjointe : Marie-Neige Cordonnier
Rédacteurs : François Savatier, Sean Bailly
Dossier Pour la Science
Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin
Développement numérique : Philippe Ribeau-Gésippe
Directrice artistique : Céline Lapert
Maquette : Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy
Correction et assistance administrative : Anne-Rozenn Jouble
Marketing & diffusion : Laurence Hay et Arthur Peys
Direction financière et direction du personnel : Marc Laumet
Fabrication : Marianne Sigogne et Olivier Lacam
Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé
Anciens directeurs de la rédaction : Françoise Pétry et Philippe Boulanger
Conseiller scientifique : Hervé This
Ont également participé à ce numéro :
Maud Bruguière, Silvana Condemi, Laurence Devillers, François Foucart, Dominique Garcia, Aline Gerstner, Eitan Haddok, Évelyne Host-Platret, Christophe Pichon, Sébastien Tanzilli

PRESSE ET COMMUNICATION
Susan Mackie
susan.mackie@pourlascience.fr – Tél. 01 55 42 85 05

PUBLICITÉ France
Directeur de la publicité : Jean-François Guillotin
jf.guillotin@pourlascience.fr – Tél. 01 55 42 84 28

ABONNEMENTS
Abonnement en ligne : http://boutique.pourlascience.fr
Courriel : pourlascience@abopress.fr
Téléphone : 03 67 07 98 17
Adresse postale : Service des abonnements - Pour la Science, 19 rue de l'Industrie, BP 90053, 67402 Illkirch Cedex
Tarifs d'abonnement 1 an - 12 numéros
France métropolitaine : 59 euros - Europe : 71 euros
Reste du monde : 85,25 euros

COMMANDES DE LIVRES OU DE MAGAZINES
http://boutique.pourlascience.fr/

DIFFUSION
Contact kiosques : À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet
Tel : 04 88 15 12 41
Information/modification de service/réassort :
www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN Editor in chief : Mariette DiChristina. Executive editor : Fred Guterl. Design director : Michael Mrak. 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. », 162 rue du Faubourg Saint-Denis 75010 Paris.
© **Pour la Science S.A.R.L.**
Siège social : 170 bis boulevard du Montparnasse 75014 Paris.
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).

Origine du papier : Autriche
Taux de fibres recyclées : 30 %
Certification : PEFC
« Eutrophisation » ou « Impact sur l'eau » :
Ptot 0,007 kg/tonne

ACPM OJD



Maurice Mashaal
rédacteur en chef

En quête de Troie

Il est tentant pour les archéologues de rechercher sur le terrain des preuves, ou du moins des traces, d'événements dont la narration s'est transmise de génération en génération pendant des siècles, voire des millénaires. On peut ainsi penser aux récits de la Bible et à l'archéologie dite biblique qui s'y rapporte.

Un autre exemple, auquel *Pour la Science* consacre dans ce numéro deux articles *(voir pages 22 à 38)*, est celui des épopées d'Homère, *L'Iliade* et *L'Odyssée*. Personne aujourd'hui n'accorde foi à ces récits qui relèvent clairement du mythe et de la légende, mais il est raisonnable de penser qu'ils ont été inspirés en partie de faits réels. Reste à savoir lesquels…

Si guerre il y a eu, contre qui ?

Vers la fin du XIX^{e} siècle, l'homme d'affaires et archéologue autodidacte Heinrich Schliemann s'est mis en quête de la ville de Troie en fouillant le site de Hissarlik, en Turquie. Et il y a découvert des vestiges dont il était persuadé qu'il s'agissait de la cité décrite par Homère. Avait-il raison ? Les campagnes de fouilles qui se sont succédé jusqu'à aujourd'hui le confirment.

Si Troie semble réelle, en est-il de même de la guerre de Troie ? C'est vraisemblable. Le verdict de l'archéologie est ici moins net, malgré des traces de destructions datant d'environ 1200 ou 1300 avant notre ère. Et si guerre il y a eu, contre qui ? Contre les Mycéniens menés par un chef héroïque qui a inspiré le personnage d'Agamemnon ? On rejoint là les mystères de la fin de l'âge du Bronze en Méditerranée orientale, cette période trouble qui a été suivie de plusieurs siècles obscurs. Et dont on espère qu'elle n'a rien de commun avec notre époque, même si l'on assiste au retour de mentalités tout aussi archaïques et va-t-en-guerre. ■

sommaire

3 Édito

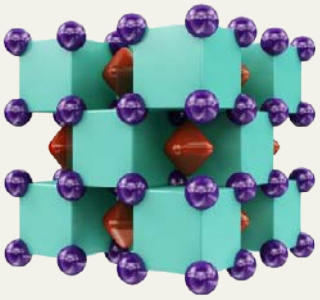
Actualités

6 Une nouvelle espèce humaine découverte en Chine

7 Une fratrie de sept planètes rocheuses

8 Un antibiotique contre la maladie de Parkinson ?

10 L'hélium se lie au sodium à haute pression



11 Intrication quantique : un test venu des étoiles

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

14 Entretien
« La médecine personnalisée n'est pas la révolution que l'on croit »
Béatrice Desvergne

18 Homo sapiens informaticus
Pince-mi et pince-moi à l'aune de Kolmogorov
Gilles Dowek

20 Cabinet de curiosités sociologiques
Les théories du complot réconfortent les perdants
Gérald Bronner



À LA UNE



22 ARCHÉOLOGIE
La guerre de Troie a bien un lieu
Ernst Pernicka, Peter Jablonka et Magda Pieniążek
La ville de Troie mentionnée par Homère a-t-elle existé ? Il semble que oui. Et ses vestiges, qui datent de l'âge du Bronze, présentent même des traces de destruction. La guerre de Troie, un mythe ancré dans une réalité ?

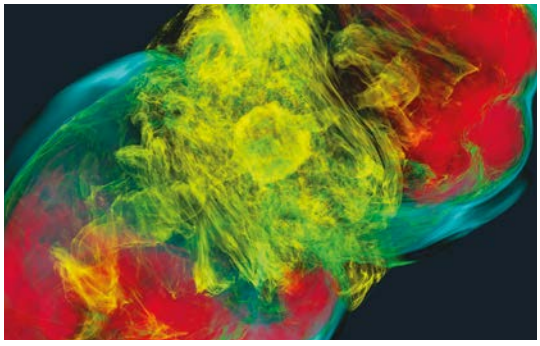
32 **Agamemnon, roi des rois à Mycènes ?**
Josef Fischer
Dans le récit d'Homère, le père d'Iphigénie est le chef des Grecs, le roi désigné pour mener l'expédition contre Troie. Ce héros mythique semble bien inspiré de personnages réels, ces princes mycéniens de l'âge du Bronze, bâtisseurs de palais-forteresses dans tout le monde égéen.

40 NEUROBIOLOGIE
Des minicerveaux fabriqués *in vitro*
Jürgen Knoblich
Faire croître en laboratoire de petits cerveaux pour étudier les mécanismes de certains troubles mentaux et tester des médicaments ? Ce projet devient réalité et révolutionne l'expérimentation en neurobiologie.

48 TECHNOLOGIE
Une horlogerie mécanique sans tic-tac
Simon Henein et Ilan Vardi
Le mécanisme à échappement des montres mécaniques, utilisé depuis la Renaissance, devient-il obsolète ? Un nouveau principe d'oscillateur promet des mouvements horlogers plus efficaces. Et plus silencieux...

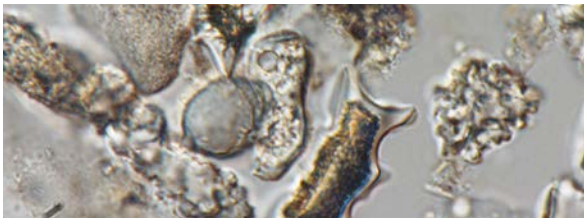
© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

56 ASTROPHYSIQUE
Des kilonovæ aux ultranovæ
Daniel Kasen
De nombreuses étoiles achèvent leur vie en de formidables explosions : les supernovæ. Or celles-ci se sont révélées d'une intrigante diversité. Quels sont les mécanismes susceptibles d'en rendre compte ?



64 ROBOTIQUE
Les robots devront parfois désobéir
Gordon Briggs et Matthias Scheutz
Faut-il s'inquiéter des machines qui refuseraient d'obéir ? Pas forcément. Il y a davantage à craindre des maîtres humains retors et des instructions ambiguës.

68 PALÉONTOLOGIE
Phytolithes : des cailloux végétaux pour révéler le passé
Thomas Hart
Dater la domestication du maïs, montrer qu'*Homo erectus* travaillait le bois, que l'homme de Néandertal mangeait des dattes… : les minuscules concrétions de silice que produisent les plantes sont de précieux indices pour les chercheurs.



76 HISTOIRE DES SCIENCES
Les extraterrestres de Churchill
Mario Livio
Sommes-nous seuls dans l'Univers ? La question a passionné Winston Churchill. Ses réflexions sur le sujet, récemment retrouvées, montrent que l'homme d'État britannique avait une solide culture scientifique et un raisonnement pertinent.

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

Rendez-vous

82 Logique & calcul
Big Brother à nos portes (dérobées)
Parfois totalement indétectables, les portes dérobées informatiques nuisent gravement à la sécurité. Elles exposent aussi chacun de nous au risque d'intrusion dans sa vie privée.

88 Science & fiction
Ralentir la lumière avec la Force
Roland Lehoucq et J.-Sébastien Steyer

91 Idées de physique
Le fantôme du candidat
Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik



94 Question aux experts
Pourquoi les sondages électoraux se trompent-ils ?
Pascal Moliner

95 Science & gastronomie
Fritures protégées
Hervé This

96 À lire

98 Bloc-notes
Les chroniques de Didier Nordon

Ce numéro comporte deux encarts d'abonnement *Pour la Science* brochés sur la totalité du tirage.
En couverture : © Shutterstock.com/LaFifa

POUR LA SCIENCE.fr LETTRE D'INFORMATION

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

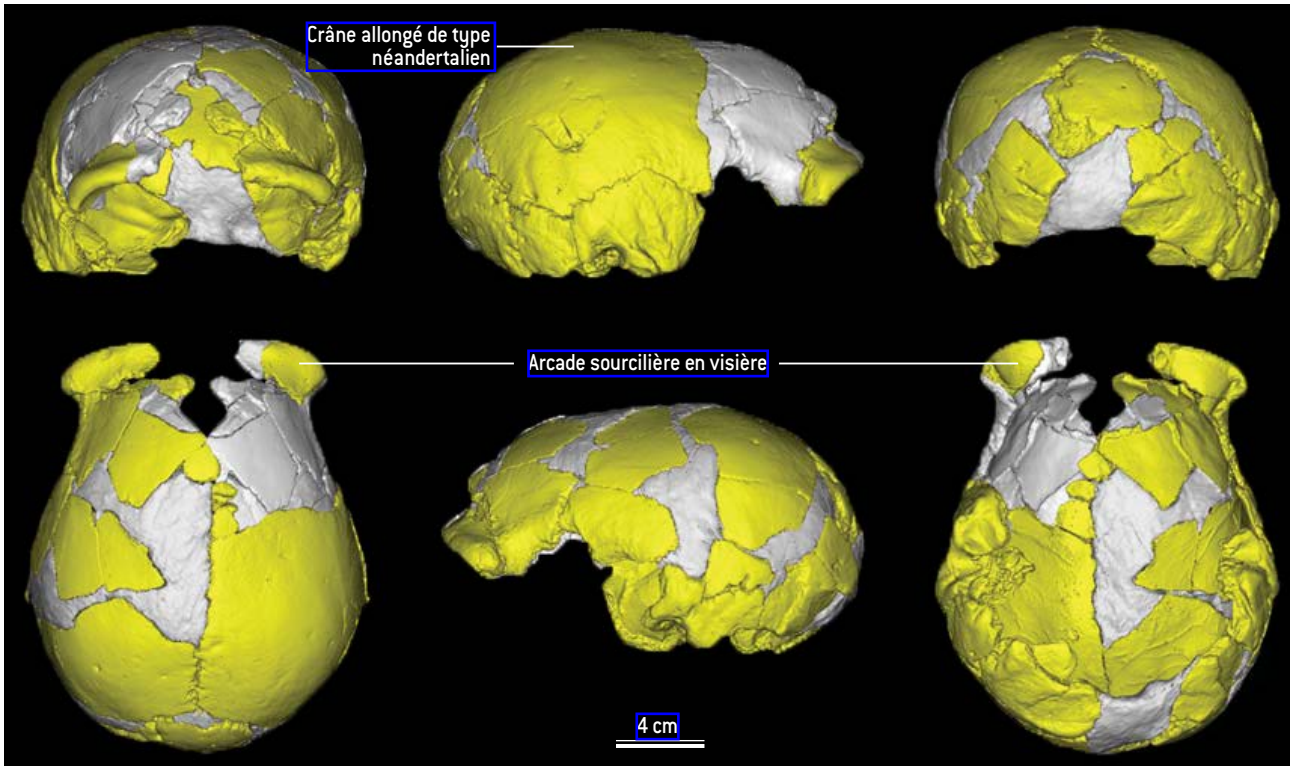
- Notre sélection d'articles
- Des offres préférentielles
- Nos autres magazines en kiosque

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

Paléoanthropologie

Une nouvelle espèce humaine découverte en Chine

Deux crânes de plus de 100 000 ans exhumés dans le Henan appartiendraient à une forme humaine inconnue jusque-là. S'agit-il de l'énigmatique hominidé de Denisova ?



En 2010, le séquençage de l'ADN extrait d'un fragment d'os découvert dans la grotte de Denisova, en Sibérie, créait une grande surprise : il appartenait à une nouvelle espèce humaine ! À ce jour, les « Denisoviens » ne sont connus que par leur ADN et les formes d'une phalange et d'une dent. Or la découverte en Chine de deux crânes partiels, par une équipe sino-américaine dirigée par Zhan-Yang Li, de l'université de Pékin pourrait compléter ce maigre tableau et laisse espérer une reconstitution de l'apparence d'un Denisovien.

Mais ces crânes sont-ils denisoviens ? Les chercheurs, dont l'éminent paléoanthropologue Erik Trinkaus de l'université Washington à Saint-Louis dans le Missouri, parlent à leur propos d'une nouvelle forme humaine ou d'une variante de Néandertalien. Ils évitent soigneusement d'employer le terme de Denisovien, auquel beaucoup de spécialistes pensent.

D'où viennent ces crânes et de quand datent-ils ? En 2007, Zhan-Yang Li achevait des fouilles près de Lingjing dans la province chinoise du Henan, soit à 4 000 kilomètres de Denisova. Il explorait un site constitué de couches sédimentaires horizontales autour d'une source, quand il tomba sur du quartz taillé. Deux jours plus tard, son équipe mettait au jour un premier morceau de crâne et décidait de prolonger ses recherches. En six mois, elle parvint à rassembler 45 fragments. Ces restes humains étaient associés à des outils de quartz taillé ou d'os et à tout un assemblage de restes de gros mammifères : cervidés, équidés, bovidés… Une série de mesures de la strate fossilifère, par luminescence stimulée optiquement, a permis de dater avec fiabilité les crânes entre 105 000 et 125 000 ans. Le climat terrestre était alors plus chaud qu'aujourd'hui.

Que traduisent ces crânes ? Il manque les mâchoires et les faces, mais les parties présentes suffisent à indiquer une ressemblance frappante avec *Homo neanderthalensis*. Le volume intérieur de l'un des spécimens atteint 1 800 centimètres cubes, ce qui est dans le haut de la fourchette des volumes crâniens des Néandertaliens et des hommes modernes. L'un des crânes est doté d'une fosse susiniaque, c'est-à-dire d'une petite dépression horizontale de forme ovale sur la partie inférieure de la nuque. Or ce trait anatomique est considéré comme un caractère propre aux Néandertaliens. Les deux crânes ont

Les deux crânes de Lingjing présentent de nombreux traits archaïques communs avec des crânes de Néandertaliens européens ou proche-orientaux, mais ils sont plus graciles. Parce qu'ils sont denisoviens ?

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

en outre des torus susorbitaires, c'est-à-dire des arcades sourcilières en visière similaires à celles des Néandertaliens. Pour autant, leur gracilité les distingue des crânes des Néandertaliens européens et proche-orientaux. Par ailleurs, ils ont contenu des cerveaux trop gros pour être ceux de représentants tardifs d'*H. heidelbergensis* (l'ancêtre d'*H. neanderthalensis* et d'*H. sapiens*) ou d'*H. erectus* (leur ancêtre).

Il ressort que même s'ils portent des traits archaïques, les crânes de Lingjing sont graciles comme des crânes d'*H. sapiens*. En outre, ils partagent des caractéristiques avec les crânes néandertaliens et sapiens, ce qui suggère un métissage. Pour l'instant, donc, il n'est pas possible de les classer.

Pour Erik Trinkaus, ces crânes ne sauraient être néandertaliens au sens strict. Sur la même ligne, son coauteur chinois Xiu-Jie Wu propose qu'ils appartiennent à une nouvelle forme humaine qui, il y a quelque 100 000 ans, constituait le type humain de l'Asie orientale. Laquelle ? « Ces fossiles sont au bon endroit et au bon moment avec les bonnes caractéristiques », commente Jean-Jacques Hublin, de l'institut Max-Planck d'anthropologie évolutionniste. Au bon endroit et avec les bonnes caractéristiques, mais pourquoi ? Pour expliquer l'énigme des Denisoviens ?

Oui, mais l'homme de Denisova n'étant connu que par son ADN, il n'est pas possible à ce jour de lui attribuer les crânes de Lingjing. La paléogénéticienne Qiaomei Fu, connue pour avoir mis en évidence un métisse *neanderthalensis-sapiens* roumain, a bien essayé d'en extraire de l'ADN. Sans succès.

François Savatier

Z.-Y. Li et al., Science, vol. 355, pp. 969-972, 2017

Astrophysique

Une fratrie de sept planètes rocheuses

En mai 2016, une équipe internationale annonçait la découverte de trois exoplanètes autour de l'étoile nommée Trappist-1. De nouvelles observations montrent que ce système est encore plus riche et contient sept planètes rocheuses de taille comparable à celle de la Terre. Émeline Bolmont, membre de l'équipe, nous en dit plus.

Pourquoi étudier une étoile telle que Trappist-1 ?

Émeline Bolmont : Cet astre, situé à seulement 40 années-lumière, est une étoile naine. Or les études montrent que ces étoiles, qui représentent 75 % des astres dans le voisinage du Soleil, hébergent beaucoup de planètes rocheuses. En outre, la détection par la méthode du transit consiste à mesurer la baisse de luminosité lorsqu'une planète passe devant l'étoile et en occulte une partie de la surface. En proportion, avec une étoile naine, la baisse de luminosité est plus importante et le transit plus facile à détecter. Enfin, les planètes sont plus proches de l'étoile et leur période orbitale est donc plus courte. Nous observons plusieurs transits pour chaque planète, ce qui nous donne plus d'informations.

Pourquoi avoir fait de nouvelles observations ?

É. B. : Les analyses de 2016 montraient la présence de signaux de planètes non encore identifiées. Plusieurs télescopes ont donc scruté le système, dont le télescope spatial *Spitzer* sur une période de 20 jours. Et nous avons découvert sept planètes, toutes de la taille de la Terre, ou un peu plus petites, et de périodes de révolution comprises entre 1,5 et 20 jours.

Vous avez aussi estimé leur masse ?

É. B. : La méthode du transit ne donne pas directement accès à la masse. Cependant, comme les planètes de Trappist-1 sont très regroupées, elles influent gravitationnellement les unes sur les autres. Conséquence : leurs orbites ne sont pas exactement périodiques et les transits sont parfois en avance ou en retard. Nous exploitons ces variations pour estimer les masses. De nouvelles données nous aideront à mieux les déli-



Émeline Bolmont, postdoctorante, CEA-Saclay

miter, et donc à connaître la densité des planètes. Nous saurons ainsi si ces corps sont pourvus d'une atmosphère. L'étude des enveloppes gazeuses sera l'un des objectifs du futur télescope spatial *James Webb*. Trappist-1 sera idéal pour les étudier, car, en observant de nombreux transits dans ce système compact, nous pourrons estimer la composition des atmosphères.

Et qu'en est-il de l'eau ?

É. B. : Trois des planètes sont dans la zone habitable, c'est-à-dire qu'elles sont à une distance telle qu'elles reçoivent juste assez d'énergie de l'étoile pour que l'eau puisse subsister à l'état liquide à leur surface. D'après nos modèles, les deux planètes les plus proches de l'étoile auraient perdu leur eau quand l'astre était jeune et qu'il rayonnait intensément. Les futures observations seront un test pour ces modèles.

Qu'avez-vous appris sur la formation des systèmes planétaires ?

É. B. : Les planètes de Trappist-1 sont en résonance orbitale. Cela signifie qu'il y a des relations particulières entre les durées de révolution. Par exemple, quand la planète nommée Trappist-1f fait quatre tours, Trappist-1g en fait trois. Ce phénomène est typique d'un système de planètes qui se sont formées dans le disque protoplanétaire à bonne distance de l'étoile, dans des régions riches en eau, puis qui ont migré vers l'étoile. Une autre question est de savoir si sept planètes rocheuses représentent une configuration exceptionnelle. Nous ne le savons pas encore. Jusqu'à présent, les modèles de formation se concentraient sur des systèmes similaires à celui du Soleil. Plusieurs équipes commencent à en développer pour des étoiles naines.

Sean Bailly

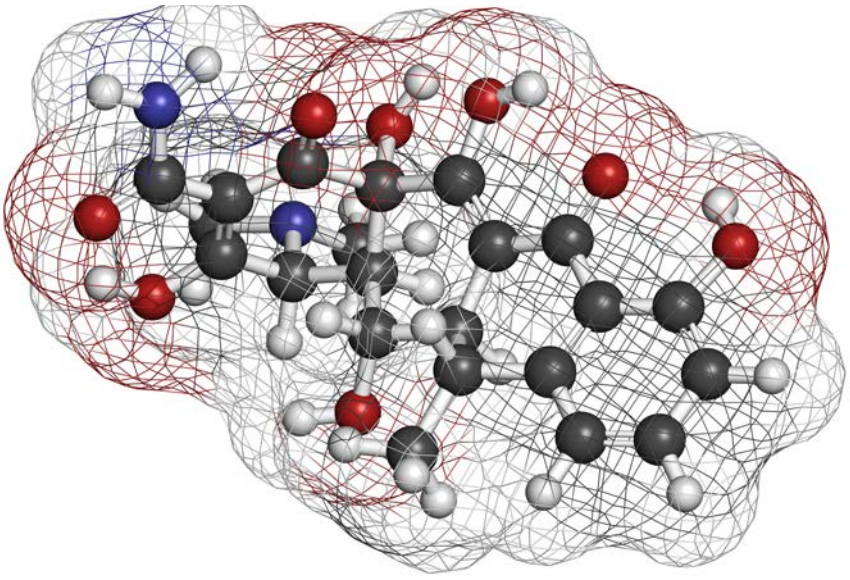
M. Gillon et al., Nature, vol. 542, pp. 456-460, 2017

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

Neurosciences

Un antibiotique contre la maladie de Parkinson ?

La doxycycline, un antibiotique classique, semble protéger les neurones d'animaux atteints de la maladie de Parkinson, en empêchant la formation d'agrégats toxiques.



© Shutterstock/molekuul_be

Représentation d'une molécule de l'antibiotique doxycycline. Cette molécule empêche la formation d'agrégats toxiques d'α-synucléines dans le cerveau.

Les synucléinopathies, ou pathologies de l'α-synucléine, sont des neurodégénérescences cérébrales liées à l'accumulation anormale d'agrégats de protéines α-synucléines dans les neurones et les cellules environnantes. Les plus connues sont la maladie de Parkinson, qui touche 1 % des personnes de plus de 65 ans (100 000 à 120 000 personnes atteintes en France), la démence à corps de Lewy et l'atrophie multisystématisée.

Dans la maladie de Parkinson, les agrégats provoquent la mort de certains neurones, d'où les symptômes moteurs : tremblements, rigidité des muscles, lenteur des mouvements. Aucun traitement empêchant la mort neuronale ou l'agrégation de la protéine pathologique n'existe à ce jour, même si plusieurs pistes sont envisagées. Cependant, Rita Raisman-Vozari, Julia Sepulveda-Diaz et leurs collègues, de l'Institut du cerveau et de la moelle épinière (ICM) à Paris, viennent de montrer qu'un antibiotique classique utilisé depuis plus d'un demi-siècle pourrait éviter la mort des neurones en modifiant l'agrégation de l'α-synucléine.

L'α-synucléine est présente dans toutes les cellules, mais sa fonction normale reste méconnue. En revanche, dans certaines conditions, elle se modifie et s'agrège pour former des oligomères, des associations de plusieurs protéines, puis des fibrilles, des enchevêtrements de plusieurs oligomères. Ces fibrilles provoquent une activation du système immunitaire et la libération de facteurs inflammatoires, qui perturbent l'activité des mitochondries (les centrales énergétiques des cellules). Des molécules oxydées toxiques apparaissent alors – ce que l'on nomme le stress oxydatif –, qui, à leur tour, amplifient le phénomène d'agrégation tout en abîmant la membrane des cellules. Tous ces facteurs contribuent à la mort des neurones.

Les chercheurs tentent donc d'agir à différents niveaux de ce processus : bloquer l'inflammation, empêcher l'agrégation de l'α-synucléine, limiter le stress oxydatif, rétablir l'activité des mitochondries. Mais les molécules efficaces *in vitro* ne protègent pas les neurones *in vivo*. Sauf une : la doxycycline, un antibiotique de la famille des tétracyclines, qui tue les bactéries, mais qui a aussi un effet protecteur chez les animaux développant une maladie de Parkinson.

Comment agit cet antibiotique ? Des études antérieures ont montré que la doxycycline a des propriétés antiinflammatoires et antioxydantes, insuffisantes toutefois pour expliquer la neuroprotection. Les chercheurs de l'ICM ont donc supposé qu'elle avait une autre cible.

En faisant incuber de la doxycycline avec des protéines α-synucléines et en utilisant des techniques d'observation moléculaire telles que la microscopie électronique à transmission, ils ont constaté que les oligomères ne se transformaient jamais en fibrilles et que l'antibiotique se liait à des sites spécifiques des oligomères. Ces derniers adoptaient alors une structure différente de celle formée sans antibiotique et incapable de s'agréger. Puis, en plaçant des cellules en contact d'α-synucléine et de doxycycline, les chercheurs ont montré qu'elles ne mouraient pas, leur membrane restant intacte.

La doxycycline ne se fixe pas sur les monomères, qui ont probablement des fonctions importantes dans les conditions normales, et traverse la barrière protégeant le cerveau. Et ce, dès l'administration d'une dose de 20 à 40 milligrammes par jour, bien inférieure à celle ayant un effet antibiotique. Il est donc envisageable de l'utiliser chez l'homme. Un essai clinique sera prochainement lancé pour évaluer son efficacité chez les patients atteints d'une synucléinopathie.

Bénédicte Salthun-Lassalle

F. González-Lizárraga et al., Scientific Reports, en ligne le 3 février 2017

1 %

des Français

de plus de 65 ans souffrent de la maladie de Parkinson. C'est la deuxième maladie neurodégénérative la plus fréquente en France. Aucun traitement curatif n'existe.

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

Archéologie

Un temple mithraïque en Corse





© Denis Gliksman/Inrap

Le bas-relief brisé trouvé dans les ruines du sanctuaire païen de Mariana avait la composition habituelle des représentations cultuelles du dieu Mithra *(ci-dessus)*.

Outre des peuples locaux, la Corse romaine comptait deux colonies : l'une, Aleria, fondée par Sylla, et l'autre, Mariana, fondée par Marius. Les *Mariani* qui l'habitaient pratiquaient certaines des religions de l'Empire. La découverte, sur le site de la colonie (à Lucciana), d'un lieu de culte dédié au dieu Mithra, par Philippe Chapon et son équipe de l'Inrap, n'étonne donc pas, mais elle illustre la romanité des *Mariani*, qui comptaient des païens, certes, mais aussi certains des premiers chrétiens de l'île.

Comme le culte mithraïque s'exerçait initialement dans des grottes naturelles, les *mithrae* étaient petits, exigus et sans fenêtres, afin d'imiter une cavité : au bout d'un couloir se trouvait une représentation du dieu Mithra tauroctone, c'est-à-dire en train de tuer le taureau. Celui de Mariana ne fait pas exception. Mesurant 11 mètres par 5, la salle de culte consistait en un couloir central surcreusé, bordé de deux longues banquettes larges de 1,8 mètre et limitées par un muret soigneusement enduit à la chaux. Deux niches voûtées en briques aménagées dans l'épaisseur des banquettes se faisaient face. L'une d'elles contenait encore trois lampes à huile intactes. Divers éléments en marbre ont été exhumés, dont une tête de femme. Deux clochettes en bronze, de nombreuses lampes brisées et des pots à pâte fine pourraient avoir servi au culte. Une plaque de bronze et une de plomb portent des inscriptions – peut-être des *ex-voto*.

On sait que le culte mithraïque a disparu après 392, l'année de la victoire de Théodose I[er] sur les derniers résistants païens. Leurs temples furent alors consacrés en églises ou détruits. Le bas-relief brisé de celui de Mariana suggère une destruction.

F. S.

De la bombe à la Lune

Le 16 juillet 1945, les États-Unis effectuaient le premier essai d'arme nucléaire de l'histoire, dans le désert du Nouveau-Mexique. La chaleur extrême dégagée par l'explosion a vitrifié une partie du sable sur un rayon de 350 mètres.

Frédéric Moynier, de l'Institut de physique du globe de Paris (IPGP) et ses collègues ont eu l'idée d'analyser la composition des verres produits afin de tester des scénarios de formation de la Lune. En effet, selon la théorie la plus probable, la Lune serait née d'une collision entre la Terre et un corps de la taille de Mars, il y a 4,5 milliards d'années. L'impact aurait conduit à un appauvrissement en éléments volatils dans les matériaux de la Lune.

Ce scénario est difficile à reproduire en laboratoire, mais les conditions de l'explosion d'une bombe nucléaire s'en rapprochent. Dans les sables vitrifiés, les chercheurs ont mis en évidence une raréfaction en zinc corrélée à la température locale lors de l'explosion nucléaire. Exactement ce qu'implique le scénario lunaire.

Physicochimie

La désagrégation d'une goutte alcoolisée

Les expériences de l'équipe d'Étienne Reyssat et de José Bico, de l'ESPCI à Paris, sont très belles. Sous l'influence de l'évaporation de l'alcool, une goutte d'un mélange eau-alcool déposée à la surface d'un bain d'huile explose en une myriade de gouttelettes.

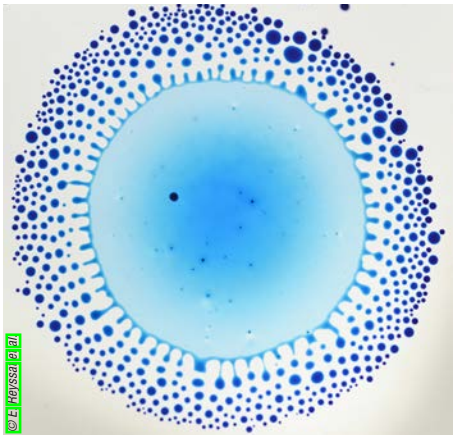
Les chercheurs ont observé qu'un régime instable se déclenche si l'alcool représente au moins un tiers de la masse de la goutte. Celle-ci commence par s'étaler, atteint en quelques secondes un rayon de l'ordre du centimètre, puis se fragmente : le bord de la goutte éjecte une multitude de gouttelettes d'un diamètre inférieur au millimètre. À partir de ce moment, le rayon de la goutte « mère » diminue et celle-ci finit par disparaître.

Que se passe-t-il ? L'évaporation de l'alcool modifie localement la tension de surface de la goutte. Or les différences de tension de surface engendrent des écoulements : c'est l'effet Marangoni, surtout étudié sur un support solide (à l'œuvre par exemple dans la formation de « larmes » sur les parois d'un verre de vin). L'évaporation de l'alcool dans la goutte est maximale aux bords, où l'épaisseur est la plus faible. La variation de tension de surface à mesure que l'alcool s'évapore engendre un écoulement Marangoni radial, du centre vers l'extérieur. À partir d'un certain point, les bords deviennent instables et se désagrègent. Des gouttelettes se forment. Du fait de la vitesse du flux Marangoni (un centimètre par seconde), elles semblent expulsées de la goutte mère.

Le mécanisme exact de l'instabilité reste à éclaircir, mais les chercheurs comprennent pourquoi le phénomène n'est pas visible lorsque le support est solide : les vitesses du flux étant alors trop faibles, les gouttelettes ne peuvent pas s'échapper.

S. B.

L. Keiser et al., Phys. Rev. Lett., vol. 118, 074504, 2017



© E. Reyssat et al.

L'évaporation de l'alcool contenu dans une goutte déposée sur un film d'huile conduit à une spectaculaire explosion de gouttelettes.

Curieuses dunes de Tchouri

Les images de la surface de la comète Tchouri prises par la sonde *Rosetta* ont révélé des structures en forme de dunes. En outre, sur un intervalle de 16 mois, ces dunes se sont déplacées. *A priori*, le dégazage radial de la comète ne permet pas leur formation. Philippe Claudin et deux collègues, de l'École supérieure de physique et de chimie industrielles, à Paris, ont étudié la dynamique de l'atmosphère ténue. Ils ont montré qu'à l'approche du périhélie de la comète, des vents thermiques soufflaient entre la face éclairée et la face cachée du corps. Ces vents, assez denses, ont transporté les grains de la surface et les ont accumulés, ce qui a formé les dunes.

Un gecko perd sa peau

Une nouvelle espèce de gecko à écailles, *Geckolepis megalepis*, a été décrite par une équipe dirigée par Mark Scherz, de l'université Louis-et-Maximilien, à Munich, et Frank Glaw, du Muséum zoologique de Munich. Parmi toutes les espèces de geckos, *G. megalepis* a les plus grandes écailles. Il est aussi capable de les perdre au moindre toucher, ce qui peut l'aider à échapper à un prédateur. En quelques semaines, les écailles et la peau se régénèrent sans laisser de cicatrices.

Sécheresses voyageuses

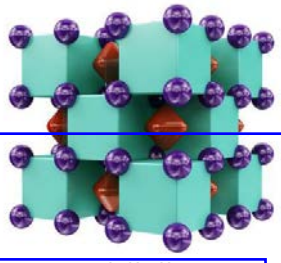
La plupart des épisodes de sécheresse évoluent au cours du temps, mais restent centrés sur une même région. En étudiant la dynamique spatiotemporelle des sécheresses entre 1979 et 2009, Julio Herrera-Estrada, de l'université Princeton, et ses collègues ont montré que dans près de 10 % des cas, ces phénomènes climatiques se déplacent parfois sur des distances importantes, entre 1 400 et 3 100 kilomètres. Ces épisodes de sécheresses sont souvent parmi les plus sévères et les plus dévastateurs pour les populations et l'agriculture.

Chimie

L'hélium se lie au sodium à haute pression

Dans le tableau périodique des éléments, l'hélium se place dans la dernière colonne, celle des éléments nobles. Comme ses comparses, il est chimiquement inerte : l'atome d'hélium ne se lie pas à d'autres, du fait de la très grande stabilité de son cortège électronique. Il existe cependant quelques rares exceptions de molécules peu stables ou faiblement liées impliquant de l'hélium.

Une façon d'obtenir des composés stables est d'augmenter la pression. Mais de telles molécules existent-elles pour l'hélium ? C'est bien ce qu'ont trouvé Artem Oganov, de l'université Stony Brook, aux États-Unis, et ses collègues. À partir d'une analyse numérique, ils ont étudié différentes configurations avec plusieurs éléments et ont montré que le sodium semble pouvoir se lier de façon stable à l'hélium. Les chercheurs ont ainsi calculé que le composé Na_2He se formerait au-dessus de 160 gigapascals. Sa structure serait semblable à celle de la fluorine (CaF_2). Elle ressemble à un échiquier tridimensionnel où chaque intersection est occupée par un atome de sodium et chaque case est alternativement occupée par un atome d'hélium ou une paire d'électrons. Les atomes d'hélium ne forment pas vraiment de liaison, mais leur présence exerce une influence sur les atomes de sodium et conduit à cette forte localisation des paires d'électrons. Ces derniers ne sont donc pas mobiles ; par conséquent, le composé est un isolant électrique.



La structure du Na_2He : en violet les atomes de sodium, en vert ceux d'hélium, en rouge les paires d'électrons.

© Artem Oganov

Sous la direction d'Alexander Goncharov, de l'institut Carnegie pour la science, à Washington, les chercheurs ont utilisé une presse de diamant pour synthétiser Na_2He. Celui-ci s'est formé à partir de 113 gigapascals. Différentes analyses ont confirmé la structure et la stabilité du composé.

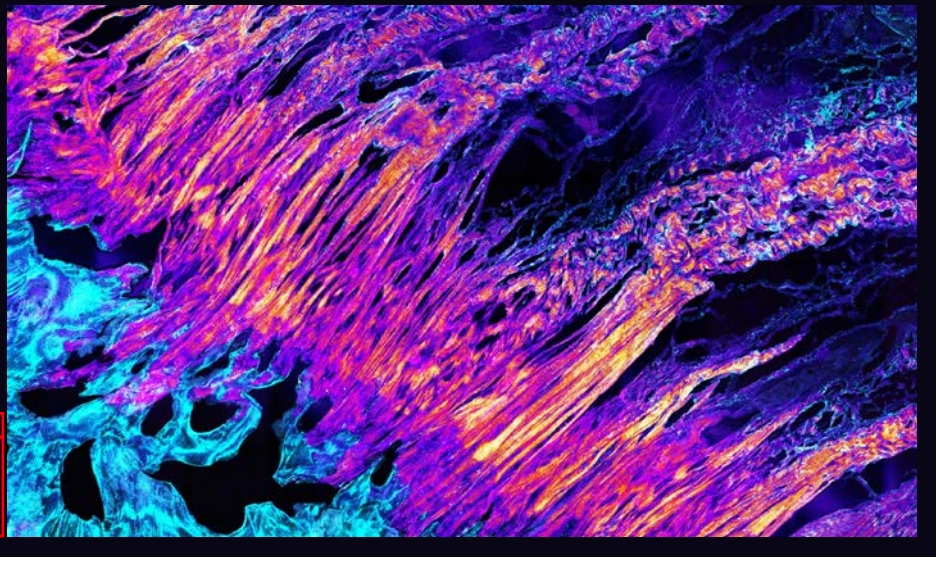
S. B.

X. Dong et al., Nature Chemistry, en ligne le 6 février 2017

Insolite

Agile talon

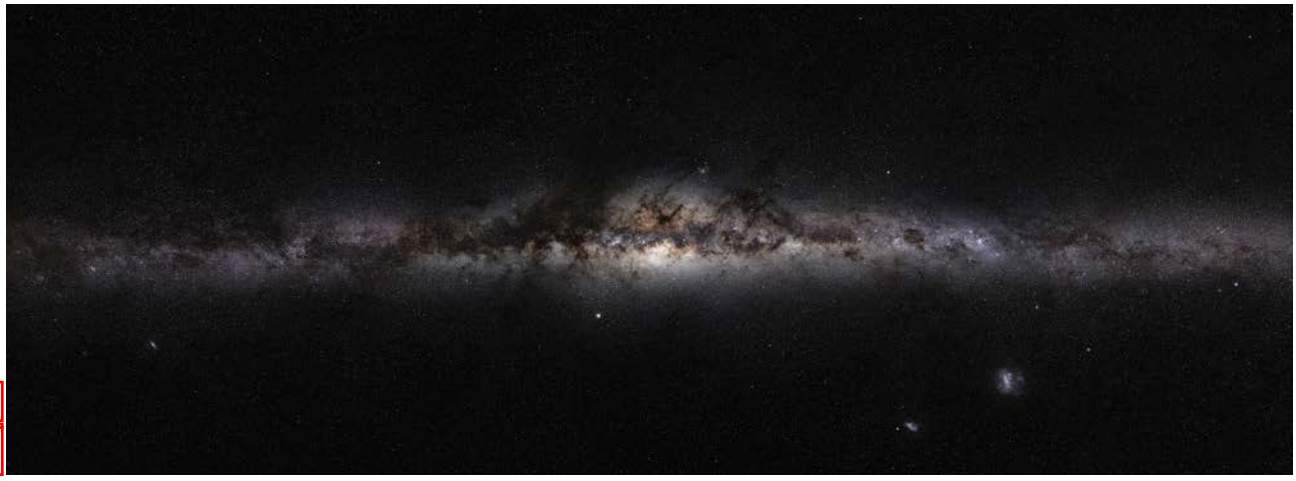
Le talon d'Achille n'était pas entièrement vulnérable. Entre le tendon *(en bas à gauche)* et l'os *(en haut à droite)* du talon, une zone de 0,5 millimètre d'épaisseur constituée de fibres de collagène assure à elle seule une connexion qui résiste à des charges équivalentes à plusieurs centaines de kilogrammes, quelle que soit l'orientation de la force appliquée. Leone Rossetti et Lara Kuntz, de l'université technique de Munich, et leurs collègues ont découvert ce tissu en scrutant la jonction au microscope confocal.



© Rossetti/Kuntz/TUM

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

Physique théorique



Intrication quantique : un test venu des étoiles

Pour mettre à l'épreuve le phénomène d'intrication quantique tout en éliminant la faille potentielle du libre arbitre de l'expérimentateur, les physiciens ont laissé la lumière venue d'étoiles lointaines choisir la configuration du dispositif...

La nature complote-t-elle contre les physiciens ? Probablement pas. C'est la conclusion à laquelle sont arrivés Anton Zeilinger, de l'université de Vienne, et ses collègues. La question survient dans certaines expériences de physique quantique, connues sous le nom de tests de Bell, dont le résultat pourrait être altéré selon que « le libre arbitre » des chercheurs est respecté ou non. Pour résoudre ce dilemme, les chercheurs ont utilisé la lumière provenant de deux étoiles lointaines.

L'enjeu de ces tests est de comprendre la nature de l'intrication quantique, un phénomène par lequel les propriétés de deux particules sont corrélées. Prenons, par exemple, deux photons intriqués, notés A et B, dont les polarisations sont toujours opposées. Tant qu'on ne les mesure pas, les états individuels des photons ne sont pas définis. En d'autres termes, on sait que le système global contient deux photons dont les polarisations sont opposées, mais on ne sait pas quel photon porte quel état de polarisation. Au moment où l'on mesure l'état de polarisation de A, celui-ci adopte une orientation, et instantanément B adopte l'autre, quelle que soit la distance qui les sépare. Ce processus semble violer un principe de la relativité restreinte : aucune information ne se déplace plus vite que la vitesse de la lumière.

Pour Albert Einstein, cela ne s'explique que si la physique quantique est incomplète. Il existerait des variables cachées transportant une certaine information qui donneraient l'impression que les particules s'accordent sur leur polarisation. Pour Niels Bohr, l'intrication quantique est un phénomène non local : les particules A et B forment un « tout » qui ne dépend pas de la distance séparant ses constituants.

Comment savoir qui d'Einstein ou de Bohr a raison ? En 1964, le physicien nord-irlandais John Bell a développé une formule, les inégalités de Bell, qui permet de trancher le débat. Jusqu'à présent, le caractère non local a été confirmé par diverses expériences. Cependant, celles-ci sont difficiles à réaliser et les conclusions ne tiennent qu'au prix de certaines suppositions. Il existe des « échappatoires » susceptibles de remettre en question les résultats.

L'une d'elles concerne le libre arbitre du physicien pour configurer les dispositifs de mesure. En effet, un phénomène du passé (variables cachées) pourrait avoir une action causale sur la configuration des détecteurs. Si les choix des physiciens sont limités d'une façon ou d'une autre, les résultats sont peut-être truqués.

Pour écarter cette hypothèse, l'équipe d'Anton Zeilinger a utilisé deux étoiles situées à plus de 500 années-lumière. La longueur d'onde de chaque photon capté en provenance de ces astres a été définie il y a donc plus de 500 ans. Les chercheurs ont asservi sur les longueurs d'onde ainsi obtenues la configuration de chacun des deux détecteurs qui mesurent l'état de polarisation des photons intriqués. Les résultats conduisent à une violation des inégalités de Bell, donc l'intrication quantique est non locale. Ainsi, si un mécanisme impliquant les variables cachées a influé sur le libre arbitre des chercheurs, il doit avoir agi il y a plus de 500 ans !

S. B.

J. Handsteiner et al., Phys. Rev. Lett., vol. 118, 060401, 2017

Les physiciens ont utilisé la lumière émise par des étoiles il y a plus de 500 ans dans la Voie lactée pour s'assurer que la nature ne « complotait » pas contre eux dans l'expérience du test de Bell. En exploitant des sources de plus en plus lointaines – étoiles, quasars ou même le fond diffus cosmologique –, ils repousseront les limites sur cette hypothèse.

Paléontologie

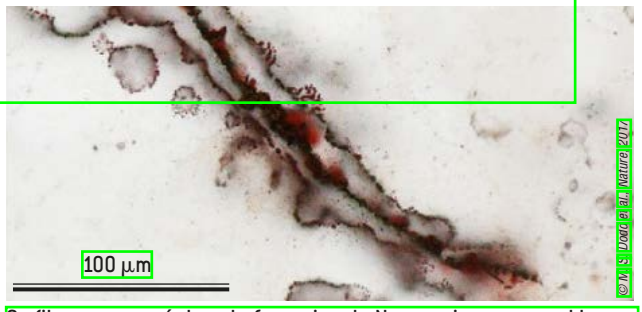
Du vivant il y a plus de 3,77 milliards d'années

Nous ignorons où la vie a commencé sur Terre. Une possibilité est que son berceau soit le voisinage d'une source hydrothermale sous-marine. D'où le caractère fascinant des fossiles de microorganismes enfermés dans les sédiments ferrugineux d'une source hydrothermale active il y a entre 3,77 et 4,28 milliards d'années, que vient de mettre au jour l'équipe de Matt Dodd, de l'université de Londres.

Ces microstructures proviennent de la formation de Nuvvuagittuq, au Québec. Elles se présentent sous la forme de tubes et de filaments d'hématite (oxyde de fer) d'échelle micrométrique, que leurs morphologies et assemblages minéraux rapprochent des microorganismes filamentaires observés dans les sources hydrothermales actuelles et des microfossiles de ces formes de vie d'époques géologiques diverses. Pour leur part, les roches de Nuvvuagittuq contiennent du carbone peu diversifié, sous la forme d'inclusions de graphite au sein de structures de carbonate et de phosphate. Une structure qui ressemble à celle que produirait l'oxydation d'une biomasse. Ainsi, de la matière organique semble avoir existé près de sources hydrothermales il y a plus de 3,77 milliards d'années, quelque 800 millions d'années après la formation de la Terre.

F. S.

Nature, vol. 543, pp. 60-64, 2017



Ce filament trouvé dans la formation de Nuvvuagittuq ressemble aux structures formées par des microorganismes vivant dans les sources hydrothermales actuelles et à leurs fossiles d'époques diverses.

La fièvre des poissons

Infectés par un virus, les poissons augmentent leur température corporelle en allant dans de l'eau plus chaude. Une étude conduite par Alain Vanderplasschen, de l'université de Liège, a mis en évidence ce phénomène de fièvre comportementale, déjà observé chez d'autres animaux à sang froid. Dans un bassin à gradient de température, les carpes saines restent dans l'eau à 24 °C. Celles qui sont infectées par un virus se déplacent vers l'eau à 32 °C et survivent à leur infection. Une molécule, TNF-α, intervient dans le déclenchement de ce comportement. TNF-α induisant aussi la fièvre chez l'homme, notre ancêtre commun se défendait sans doute déjà par un mécanisme thermique similaire il y a plus de 400 millions d'années.

LES RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM
Partagez les savoirs
Entrée gratuite
Au Jardin des Plantes
Détails sur mnhn.fr, rubrique : "Les rendez-vous du Muséum"

CONFÉRENCES
Cycle Quand tourisme responsable rime avec biodiversité
Lundi 3 avril - 18h : Accueillir le public dans les Espaces naturels sensibles, l'exemple du département de l'Essonne
D. Pecquet, chef de service du Conservatoire des Espaces naturels sensibles, Conseil départemental de l'Essonne

FILMS
Cycle Pousse-Pousse (pour les enfants à partir de 5 ans)
Samedi 22 avril - 16h : La petite fabrique du monde
(42'). Programme de 6 films

MÉTIERS DU MUSÉUM
Dimanche 23 avril - 15h : Bioacousticien, *J. Sueur*

TABLE-RONDE
Cycle en lien avec l'Année internationale du Tourisme durable pour le développement
Lundi 24 avril - 18h : Tourisme sportif et biodiversité. Cas de Fontainebleau
Animée par *J-P. Siblet*, directeur du service Patrimoine naturel Muséum, avec *D. Bauchard*, président de l'association des Amis de la Forêt de Fontainebleau, *M. Liron*, géologue, vice-présidente de l'association des Naturalistes de la Vallée du Loing et du massif de Fontainebleau, et *J-M. Martin*, directeur de la Réserve de biosphère de Fontainebleau-Gâtinais

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

POUR LA SCIENCE
MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

Embryologie

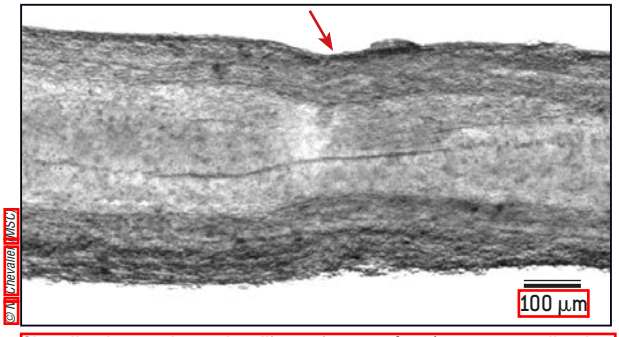
Comment l'intestin apprend à digérer

Quand vous avalez vos céréales le matin, la progression du bol alimentaire dans l'intestin se fait grâce à la contraction des muscles des parois. Ce phénomène automatique, appelé péristaltisme, est géré par le système nerveux entérique, intrinsèque à l'intestin. Pour mieux le comprendre, Nicolas Chevalier, du laboratoire Matière et systèmes complexes (université Paris Diderot, CNRS, Sorbonne-Paris-Cité), à Paris, et ses collègues ont étudié son apparition dans l'intestin de l'embryon de poulet. Ils ont constaté que le péristaltisme se déclenche au moment où apparaissent les muscles lisses de la paroi intestinale, avant même la connexion de l'intestin au système nerveux entérique. Les chercheurs ont aussi montré qu'il se développe indépendamment du reste de l'organisme et de la taille de l'intestin : mis en culture, l'intestin embryonnaire produit des contractions de plus en plus puissantes au cours du temps, bien que sa taille n'augmente pas. Une explication possible est la suivante : les ondes de contraction résulteraient d'une instabilité dynamique (une onde solitaire) qui se propagerait de cellule en cellule dans le tissu musculaire. Les neurones, accolés aux muscles, amplifieraient cette dynamique primitive et en prendraient le contrôle plus tard.

Au stade embryonnaire, la contraction de l'intestin n'a aucun rôle nutritif, puisque l'embryon est alimenté par voie veineuse. Son éventuel rôle physiologique reste donc à définir. En matière de digestion, notre curiosité est encore loin d'être rassasiée !

Aline Gerstner

N. R. Chevalier et al., Plos One, 21 février 2017



© N. Chevalier, MSC

Chez l'embryon de poulet, l'intestin est très tôt parcouru d'ondes de contraction *(flèche)* indépendantes du reste de l'organisme, et notamment de l'activité neuronale.

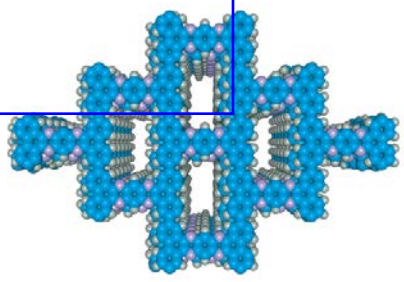
Chimie

Des polymères organiques pour remplacer le graphène

Isolé en 2004, le graphène, matériau bidimensionnel constitué d'atomes de carbone agencés en hexagone, présente des propriétés électroniques et mécaniques exceptionnelles. Néanmoins, le manque de modularité de sa structure limite ses applications et ses performances. Afin de contourner cette difficulté, Wei Liu et ses collègues de l'université nationale de Singapour ont synthétisé des analogues organiques du graphène.

La difficulté dans la fabrication de tels matériaux réside dans l'organisation des unités de base, qui sont ensuite liées entre elles pour constituer un polymère 2D. Jusqu'à présent, les seuls exemples de matériaux organiques plans et réguliers ont été réalisés à l'aide de liaisons carbone-azote. Mais ces liaisons n'ont pas la robustesse des liaisons carbone-carbone du graphène. Et les tentatives de synthèse n'ont conduit qu'à des solides amorphes ne présentant aucune régularité de structure.

Wei Liu et son équipe ont choisi de préorganiser les précurseurs, des composés plans tétrabromés nommés 2-TBQP, avant l'étape de polymérisation. Ils ont tout d'abord réalisé un cristal de 2-TBQP, dans lequel les monomères sont parfaitement organisés et alignés. Puis, en chauffant à 520 °C, ils ont provoqué la débromation des monomères. Ceux-ci se lient alors à leurs voisins *via* quatre liaisons carbone-carbone, formant le polymère organique plan *(ci-dessus)*.



© Wei Liu et al./Nature Chemistry 2017

Le solide cristallin ainsi obtenu est constitué d'un assemblage de feuillets plans (tout comme le graphite est constitué de feuillets de graphène), que Wei Liu et son équipe ont ensuite exfolié en minces couches à l'aide d'un simple ruban adhésif.

Les feuillets de ce polymère 2D ont été caractérisés par microscopie électronique. Leur structure est très régulière. Les chercheurs ont aussi montré l'intérêt de ce nouveau matériau comme anode pour des batteries sodium-ion. La structure poreuse permet la libre circulation des ions sodium lors des cycles de charge et de décharge. Elle confère à la batterie une stabilité et une capacité encore jamais atteinte, y compris avec des anodes en graphène.

Cette méthode de synthèse pourrait être généralisée à d'autres équivalents organiques du graphène.

Martin Tiano

Wei Liu et al., Nature Chemistry, en ligne, 16 janvier 2017

La biodiversité influe sur la floraison

On savait que le réchauffement climatique tend à avancer la date de floraison des plantes. Amelia Wolf, de l'université Columbia, et ses collègues ont montré que la perte de diversité dans un type de prairie californienne a un effet similaire. Les chercheurs ont observé la floraison dans des portions de terrain où ils avaient limité le nombre d'espèces. La plupart des plantes présentes fleurissaient plus tôt. Les variations d'humidité, de température et de concentration en azote dans le sol pourraient expliquer cet effet.

Perturbateurs endocriniens et cerveau

Les hormones thyroïdiennes sont essentielles pour le développement du cerveau des vertébrés. Chez l'homme, une concentration anormale de ces hormones aux stades précoces du développement embryonnaire est associée à un déficit de QI et à une modification de la structure cérébrale de l'enfant. Jean-Baptiste Fini, du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, et ses collègues ont montré sur des embryons de grenouilles qu'un mélange de quinze substances connues comme perturbateurs endocriniens et présentes dans des produits courants modifie le fonctionnement de ces hormones et le développement cérébral.

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

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

ENTRETIEN

« La médecine personnalisée n'est pas la révolution que l'on croit »

Les ambitions de la médecine personnalisée sont-elles survendues ? Sans doute en termes de prévention, mais elle devrait améliorer le diagnostic et le traitement de certaines maladies dans un avenir proche.



Béatrice DESVERGNE est médecin et professeure de biologie à l'université de Lausanne, en Suisse.

© Yann Mingard

En décembre 2016, le ministère chargé de la santé a lancé un appel à projets pour la mise en œuvre et l'évaluation de deux plateformes de séquençage très haut débit à visée sanitaire. La construction de ces deux plateformes constitue la phase pilote du plan France médecine génomique 2025, annoncé en juin 2016, qui vise à développer la médecine personnalisée *via* le séquençage du génome et prévoit la création de douze plateformes de ce type, ainsi que de dispositifs pour engranger les informations et les traiter. Le rapport d'Aviesan (l'Alliance française pour les sciences de la vie et de la santé) qui a abouti à ce plan de 670 millions d'euros parle d'un changement de paradigme en médecine. Entre-t-on réellement dans une nouvelle ère ? Que peut-on attendre de la médecine personnalisée ? Le point avec Béatrice Desvergne, biologiste des systèmes complexes à l'université de Lausanne, en Suisse.

POUR LA SCIENCE
Qu'appelle-t-on médecine personnalisée aujourd'hui ?

BÉATRICE DESVERGNE : Le terme a d'emblée provoqué des réactions, car il suggérait que la médecine personnalisée n'existait pas auparavant, ce qui est faux. Depuis longtemps, le médecin adapte les traitements à son patient en fonction des différentes informations récoltées à son sujet. Mais depuis une dizaine d'années, ce terme a pris une autre signification avec l'avènement de la biologie des systèmes, qui s'appuie sur l'acquisition de données aussi exhaustives que possible sur un système biologique. L'idée est d'interpréter de façon judicieuse ce vaste ensemble de données afin d'améliorer notre compréhension du vivant et de ses pathologies, et de cibler les traitements de façon plus spécifique en fonction des données liées à chaque patient.

D'autres dénominations ont été proposées, telles que médecine de précision, stratifiée ou 4P (personnalisée, prédictive, préventive, participative) en fonction de ce que l'on souhaitait mettre en avant. Mais le terme « médecine personnalisée » a continué à être utilisé dans la communication. Il ne faut donc pas trop se focaliser sur le mot « personnalisée », mais sur ce que l'on met derrière.

PLS
On fait souvent l'amalgame avec la médecine génomique. La médecine personnalisée se résume-t-elle à celle-ci ?

B. D. : Le principal déclencheur de la médecine personnalisée a été le séquençage du génome. Aujourd'hui, on séquence le génome d'une personne pour moins de 1 000 euros, et séquencer le génome entier de chaque individu fait partie des réalités de demain. Cette connaissance du génome de chaque individu laisse espérer qu'en comprenant la contribution de chaque gène au fonctionnement de l'organisme humain, on va comprendre les effets des altérations ou simplement des variations d'un individu à un autre. À partir de cette information, on déduira, grâce à un algorithme qui n'est pas encore dessiné, les risques d'avoir telle ou telle pathologie et, surtout – ce qui commence à être fait aujourd'hui – comment telle personne est susceptible de répondre à tel traitement. C'est pour cela qu'il y a confusion entre médecine génomique et médecine personnalisée, même si cette dernière est bien plus large en théorie.

PLS
Quelles sont les autres informations que l'on pourrait exploiter ?

B. D. : Dans la seconde moitié du XX^{e} siècle, le développement de la nouvelle biologie moléculaire, très centrée sur l'étude des gènes, a conduit à penser qu'on allait comprendre toute l'organisation du vivant en étudiant les interactions moléculaires. De fait, on a appris énormément, mais cela n'a pas permis de comprendre la complexité de l'organisme

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

dans son ensemble. C'est alors que la biologie des systèmes a proposé une approche globale des individus grâce à la génomique et aux autres « -omiques » : transcriptomique, protéomique, épigénomique, métabolomique, etc.

Prenons la transcriptomique. Jusqu'à il y a vingt ans, quand un biologiste voulait étudier l'effet d'une substance sur des cellules humaines en culture, il mesurait cet effet sur chaque protéine d'intérêt individuellement – dix à vingt en général. Ou plus souvent sur le niveau d'expression du gène qui la code, c'est-à-dire sur la concentration de l'ARN messager, l'intermédiaire transcrit à partir de ce gène. Aujourd'hui, grâce aux analyses sur micropuce, on obtient en une fois les modifications de l'expression de tous les gènes dans une cellule ou une population de cellules (en culture ou tissulaire), soit entre 20 000 et 100 000 informations.

De même, la protéomique est l'analyse de l'ensemble des protéines synthétisées par une cellule ou un organe, l'épigénomique, l'analyse de l'ensemble des modifications du génome qui ne touchent pas la séquence d'ADN, et la métabolomique, le recensement de tous les métabolites produits par la cellule. L'idée est qu'avec toutes ces « -omiques », on puisse reconstituer le fonctionnement des cellules, de l'organe et, à terme, de l'organisme entier dans toute sa complexité. Mais pour l'instant, on n'y arrive pas. Cela reste très compliqué, d'une part à cause de l'imposant volume d'information à traiter et, d'autre part, en raison des différentes échelles spatiales et temporelles impliquées. Autant le séquençage du génome d'un individu fournit le même résultat tout au long de sa vie, autant toutes les autres « -omiques » ne sont vraies qu'à un instant *t*, dans un tissu particulier et un contexte environnemental spécifique.

Ces données « -omiques » (en dehors de la génomique) n'ont donc un sens que si on les produit avec une question très précise derrière : on veut savoir, par exemple, comment le foie réagit à telle drogue et on analyse les « -omiques » deux-trois heures après le traitement. Ainsi, non seulement ces examens ne sont pas du tout routiniers chez l'homme, mais ils ne sont pas applicables en l'état à l'étude d'une maladie : quand une personne est malade, c'est l'ensemble du corps qui est atteint. Cette complexité de l'organisme fait que la médecine personnalisée ne pourra dépasser le cadre génomique que dans des cas extrêmement spécifiques.

PLS

Les autres « -omiques » restent-elles utiles ?

B. D. : Oui, mais surtout en recherche. C'est la situation aujourd'hui de la médecine personnalisée, où il est nécessaire d'avoir une très grande porosité entre la recherche et le soin. Si l'on veut améliorer le soin, il faut accepter de passer par une phase d'exploration et de compréhension des phénomènes fondamentaux. C'est en augmentant le nombre de personnes dont le génome est séquencé et qui sont suivies au fil du temps que l'on précisera nos connaissances. Et à leur tour, ces connaissances aideront à mieux comprendre les dysfonctionnements, voire à les anticiper. La phase exploratoire actuelle est indispensable, car on n'a pas aujourd'hui les outils pour estimer votre risque de développer un diabète dans dix ans, par exemple.

PLS

Que peut-on espérer de la médecine personnalisée en termes de prévention ?

B. D. : Il n'existe pour l'instant que quelques maladies très spécifiques où l'on est capable, à partir des informations collectées sur une personne, de dire si elle est susceptible de développer la maladie en question. Il s'agit essentiellement des maladies monogéniques, causées par des mutations sur un seul gène, telle la maladie de Huntington. Le cas du cancer du sein lié à une mutation des gènes *BRCA1*/*BRCA2* est emblématique dans ce cadre. On sait que si une personne présente une mutation sur un de ces gènes, elle a 80 % de risques de développer un cancer, et une chirurgie préventive peut être proposée. Enfin, pour nombre de maladies dites orphelines, le séquençage possible de chaque individu atteint va énormément faciliter l'identification du gène en cause et permettre de proposer des thérapies voire des mesures préventives adaptées.

En revanche, contrairement à ce que laissent entendre certains promoteurs de la médecine personnalisée, on n'a pas encore les outils pour anticiper la maladie d'Alzheimer, le diabète de type II et autres maladies dites communes (cardiovasculaires, métaboliques, neurodégénératives…).

PLS

Quel est le problème ?

B. D. : Ces maladies sont dites communes car elles touchent une part importante de la population. Hormis quelques cas familiaux particuliers, elles ne sont pas liées à la perturbation d'un seul gène, mais sont le résultat de la conjonction de nombreux facteurs, certains génétiques, d'autres non.



© ROYONIC | SHUTTERSTOCK.COM

LA MÉDECINE PERSONNALISÉE est souvent assimilée à la médecine génomique – le séquençage du génome à la recherche de mutations associées à des maladies –, car cette méthode est la plus facile à mettre en œuvre actuellement, même si elle est loin de répondre à toutes les questions.

Il va être encore plus indispensable d'avoir un médecin de famille référent au cœur du système

Après le premier séquençage complet d'un génome humain, en 2003, des études ont été lancées pour identifier les variants génétiques qui avaient un impact important sur la survenue du diabète – les GWAS (Études d'association pangénomique). L'idée était de partir de populations ayant un diabète et de populations saines, et de répertorier sans *a priori* toutes les variations significatives entre les deux groupes. Or les résultats obtenus sont très décevants. On a bien identifié des gènes dont la variation est corrélée à un diabète de type II, mais l'impact de chaque variation est très faible. De fait, sur les 3,2 milliards de paires de bases du génome humain, 12 à 15 millions sont connues pour varier au sein de la population humaine dans les quelque 20 000 gènes du génome (lesquels correspondent à 1,2 % de celui-ci), et deux individus quelconques diffèrent d'environ 3 000 de ces variations, nommées SNP (Polymorphisme sur un seul nucléotide). Toutes ces variations ne sont pas responsables d'une altération du fonctionnement de l'organisme. Et lorsqu'elles ont une influence, l'impact est statistiquement significatif, mais quantitativement faible. Que faire de tels résultats ? Lorsque, chez une personne non diabétique, on détecte une variation sur un gène qui augmente le risque de 1 à 1,2 par rapport au risque moyen de la population, quelle information et quelle prévention lui proposer ?

De plus, il est difficile d'étudier l'effet d'associations de SNP, chaque individu étant porteur de son propre lot de variations. Des solutions viendront avec l'augmentation de la taille des échantillons parmi la population et des diverses informations que l'on engrangera sur eux : génétiques, mais aussi phénotypiques et sur l'environnement, le mode de vie, grâce notamment aux objets connectés. Cela permettra de stratifier les patients en sous-groupes plus homogènes, qui aideront à mieux évaluer le risque de maladie associé à tel profil. Mais le chemin est encore long pour y parvenir.

PLS

Du point de vue diagnostique et thérapeutique, la médecine personnalisée a-t-elle déjà des succès à son actif ?

B. D. : Le traitement ciblé du cancer est mis en œuvre depuis quelques années, avec des résultats encourageants, mais encore limités. On cite souvent le cas de l'imatinib (commercialisé sous le nom de Glivec), le seul traitement que l'on administre en monothérapie pour les cancers qui y sont sensibles (ceux où le gène d'une enzyme, Bcr-Abl, est muté, telle la leucémie myéloïde chronique). L'idée est simple : repérer une mutation et contrer son effet à l'aide d'un médicament spécifique. Cependant, on sait aujourd'hui que les tumeurs sont un tissu très hétérogène. Les cellules qui portent la mutation repérée et combattue sont peut-être majoritaires, mais pas forcément les plus agressives, et les tuer peut laisser le champ libre à d'autres plus invasives. C'est pour cela qu'en général, on combine les traitements : opération, chimiothérapie, radiothérapie… Cependant, les approches personnalisées permettent de faire un typage moléculaire de la tumeur, de rechercher divers marqueurs prédictifs de son agressivité et de sa réponse potentielle aux traitements, et donc de choisir la meilleure approche en conséquence.

La pharmacogénomique a aussi beaucoup progressé grâce à la médecine personnalisée, car le séquençage du génome facilite cette approche et devrait la rendre plus systématique très prochainement. L'idée est de repérer dans le génome les gènes dont l'expression module le métabolisme d'un médicament donné. En fonction des variations présentes dans ces gènes chez un patient, on décidera si on peut lui donner cette molécule et à quelle dose. Cette approche est déjà utilisée et des essais cliniques sont en cours pour en augmenter la portée.

PLS

On est encore loin des promesses avancées – les 4P que vous évoquiez. La médecine personnalisée est-elle utopique ?

B. D. : La feuille de route des 4P – médecine personnalisée (propre à chaque individu), prédictive (établissant des facteurs de risque), préventive et participative (où le patient participe activement à la prévention et à la décision thérapeutique) – implique plusieurs présupposés : que le génome soit intelligible en soi, que les facteurs de risque soient connus pour les maladies majeures, ainsi que les mesures qui permettraient de les éviter en fonction du risque rencontré. Elle suppose aussi que l'on comprenne les résultats et les diagnostics obtenus : que signifie concrètement avoir trois fois plus de risque de contracter la maladie d'Alzheimer que son frère ?

BIBLIOGRAPHIE

D. Stoppa-Lyonnet et S. Lyonnet, **Les 100 Mots de la génétique**, PUF, 2017.

X. Guchet, **La Médecine personnalisée. Un essai philosophique**, Les Belles Lettres, 2016.

A. Claeys et J.-S. Vialatte, **Les progrès de la génétique : Vers une médecine de précision ? Les enjeux scientifiques, technologiques, sociaux et éthiques de la médecine personnalisée**, Rapport de l'OPECST, 2014. ladocumentationfrancaise.fr

P. Corvol (dir.), **La prévention du risque en médecine. D'une approche populationnelle à une approche personnalisée**, Collège de France, 2012.

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

De fait, on est donc encore loin de remplir les seuls prérequis des 4P, mais si déjà on y parvenait, la médecine aurait fait un grand pas. Or avec la taille croissante des populations analysées, ces aspects devraient se préciser. On peut aussi penser que les diagnostics vont s'améliorer. Dans un avenir peut-être pas si éloigné, on pourra ajouter au diagnostic d'une maladie tout le contexte plus ou moins personnel du patient, le rapprocher ainsi d'une sous-population d'individus présentant des caractéristiques similaires et adapter son traitement aux informations engrangées sur cette strate : la médecine deviendra alors plus personnalisée qu'aujourd'hui.

PLS

Peut-on parler d'un changement de paradigme ?

B. D. : Non, je ne pense pas, pas à ce jour. Le changement de paradigme viendra avec la capacité à vraiment devenir prédictif et préventif pour les maladies communes, c'est-à-dire à réduire considérablement les risques qu'elles se déclenchent à l'aide d'approches plus performantes et surtout plus ciblées que celles que l'on utilise aujourd'hui. On n'a en effet pas besoin de dépenser 670 millions d'euros pour dire à une personne qu'elle doit faire du sport ou adopter tel régime en prévention des maladies métaboliques. Aujourd'hui, ce qui est déjà positif à mon sens dans toute cette approche, c'est le développement d'une aide à la décision thérapeutique, c'est-à-dire l'ajustement des traitements en fonction de certains facteurs, qui ne sont pas tous génétiques.

En revanche, cette approche va sans doute considérablement modifier le paysage médical, notamment la place du médecin. Avec cette adjonction d'informations, il va être encore plus indispensable d'avoir un médecin de famille référent au cœur du système. Des systèmes d'apprentissage automatique, tel le système analytique Watson d'IBM, sont aujourd'hui capables d'explorer en quelques secondes les millions d'articles scientifiques qu'ils ont en mémoire et de proposer un traitement à partir des informations données sur le patient : âge, caractéristiques, type de pathologie, signes, données génomiques, etc., alors qu'un chercheur mettrait six mois à y parvenir. Mais il s'agit d'un traitement purement technique, un choix statistique fondé sur des travaux entrés dans la machine. Or on ne peut se contenter de placer le patient seul au cœur d'un système de machines, alors même qu'on lui demande de comprendre et de participer aux mesures préventives et aux décisions thérapeutiques. C'est bien le couple patient-médecin qui sera au centre. ■

Propos recueillis par Marie-Neige CORDONNIER



HOMO SAPIENS INFORMATICUS chronique de Gilles Dowek



Pince-mi et pince-moi à l'aune de Kolmogorov

Les notions de complexité et de compression de l'information nous dévoilent une partie des mécanismes de l'humour.

Une devinette lors d'un dîner : « Justine et Juliette sont dans le bateau du marquis de Sade. Justine tombe à l'eau. Qui est-ce qui reste ? Pince-moi bien sûr. » Tout le monde rit, sauf l'un des convives – un Japonais. Notre hôte entreprend de lui expliquer l'innocente farce des cours de récréation, le sulfureux marquis, ses séjours à la Bastille et à l'asile de Charenton, les héroïnes de ses romans : Justine et Juliette. Tout un pan de notre culture. Peine perdue. Le Japonais écoute poliment, opine du chef, mais, à la fin de la laborieuse explication, ne rit toujours pas : pour une raison mystérieuse, une histoire cesse d'être drôle quand on l'explique. La théorie algorithmique de l'information, cependant, éclaire peut-être ce mystère d'une lumière nouvelle.

S'il n'est pas évident de définir la quantité d'information qui se cache derrière l'énoncé de la devinette, il est plus simple de le faire avec une suite de caractères. En effet, quand un programme produit une telle suite, nous pouvons comparer la taille de la suite produite à celle du programme lui-même. Le programme `for i=1 to 500000 print "ab"`, par exemple, produit une suite de un million de caractères : `abababab...ab`, bien qu'il n'en comporte lui-même qu'une trentaine. Ce programme est beaucoup plus court que la suite qu'il produit, parce que cette suite est très régulière : elle se laisse compresser en un très petit programme.

En théorie de l'information, la « complexité de Kolmogorov » d'une suite de caractères est la taille du plus petit programme qui la produit. Elle mesure la quantité d'information de la suite bien mieux que la taille de la suite elle-même.

Cette notion de complexité sert à définir la notion d'aléa : selon Andreï Kolmogorov, une suite est « aléatoire » quand elle est totalement irrégulière, impossible à compresser, c'est-à-dire quand sa complexité est égale à sa taille. Mais cette notion est également intéressante en soi, car l'art de dire beaucoup avec peu de mots se retrouve partout : en grammaire, où l'usage de pronoms permet de remplacer un mot par un autre plus bref, qui signifie provisoirement la même chose ; dans la caricature, qui croque en quelques traits une personne et ses défauts ; dans le roman, qui fait tenir la vie d'un personnage en quelques centaines de pages ; dans la poésie, qui évoque davantage qu'elle n'explicite ; dans la science, qui fait tenir tout l'Univers dans une seule équation ; etc.

Parler, écrire, écouter, lire, comprendre, etc. nous demandent un effort. C'est pourquoi nous préférons dire « ketch », plutôt que « voilier à deux mâts, dont le mât avant est plus grand que le mât arrière ». Ainsi, dans une énonciation, la taille de l'énoncé, « ketch », est un coût, tandis que celle de la suite engendrée dans la tête de l'interlocuteur, « voilier à deux mâts, dont le mât avant… », est un bénéfice.



UNE BLAGUE, UN ALGORITHME
ou un geste comme celui peint dans ce portrait de Gabrielle d'Estrées (vers 1594) véhiculent des informations compressées.

© Getty Images/Corbis Historical

Parfois, le rapport bénéfice/coût est extraordinaire : la simple expression « Pince-moi » convoque dans notre tête l'innocente farce des cours de récréation, le sulfureux marquis, Justine et Juliette, etc., y provoque la collision de la candeur et de la cruauté, de deux âges, de deux époques : un véritable feu d'artifice. Tant d'information véhiculée à si peu de frais nous ravit. Et ce ravissement provoque la contraction des muscles de notre visage, l'ouverture de notre bouche, les mouvements de notre appareil respiratoire et l'enchaînement de petites expirations saccadées : nous rions.

Mais quand l'histoire nous est expliquée, le coût de l'énonciation croît et le rapport entre son bénéfice et son coût décroît en conséquence. En deçà d'un certain seuil, les muscles de notre visage ne se contractent plus, notre bouche reste fermée et notre appareil respiratoire au repos.

Cela ne nous empêche pas d'être polis : « Merci. Cette histoire de Pince-mi et Pince-moi était très intéressante. » ■

Gilles DOWEK est chercheur à l'Inria et membre du conseil scientifique de la Société informatique de France. Il vient de publier avec Serge Abiteboul le livre **Le temps des algorithmes** *(Le Pommier, 2017).*

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

Dans l'intérêt de la science

mathieu vidard

la tête au carré
14:05-15:00



france intervenez

franceinter.fr

CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES par Gérald Bronner



Les théories du complot réconfortent les perdants

Le conspirationnisme tend à séduire ceux qui ressentent une perte de contrôle sur leur vie et leur environnement.

Aux États-Unis, trois chercheurs en science politique – Christina Farhart, Joanne Miller et Kyle Saunders – ont fait récemment une curieuse constatation. Alors que dans ce pays, les partisans du Parti républicain sont statistiquement plus enclins à endosser des théories du complot que les Démocrates, la tendance paraît s'inverser ces derniers mois.

Immédiatement après les élections de novembre, une enquête sur un échantillon représentatif a en effet montré que la disposition à croire des énoncés conspirationnistes classiques a augmenté chez les Démocrates, alors qu'elle a baissé chez les Républicains, passant de 28 % à 19 % ! L'enquête portant sur l'adhésion aux mêmes énoncés, comment expliquer cette curiosité sociologique ?

Ceux qui se sont penchés sur les mythologies du complot ont parfois expliqué que le sentiment de perte de contrôle, de vivre dans un environnement sur lequel on ne pouvait plus agir, favorise les propositions intellectuelles de type conspirationniste, lesquelles visent à expliquer les phénomènes du monde comme étant dus à des volontés puissantes et occultes.

En ce sens, les interprétations conspirationnistes permettent d'évacuer le caractère arbitraire des événements en les rapportant à des *intentions*. Depuis la victoire de Donald Trump, les électeurs démocrates, conscients de ne plus être dans le camp des vainqueurs, développeraient donc un peu plus cette appétence pour des modes d'explication donnant un sens à ce sentiment de dépossession.

C'est par exemple la thèse forte que développent Joseph Uscinski et Joseph Parent, de l'université de Miami, dans leur livre dont l'un des chapitres porte le titre provocateur : *Conspiracy theories are for losers*. Selon eux, le complotisme frappe particulièrement les groupes sociaux qui, pour une raison objective ou fantasmée, ont ce sentiment de dépossession ou de déclassement. Il devient une forme de stratégie mentale pour lutter contre une situation anxiogène.



EN CROYANT À DES MANIPULATIONS, les gens donnent un sens à leur sentiment de dépossession ou de déclassement.

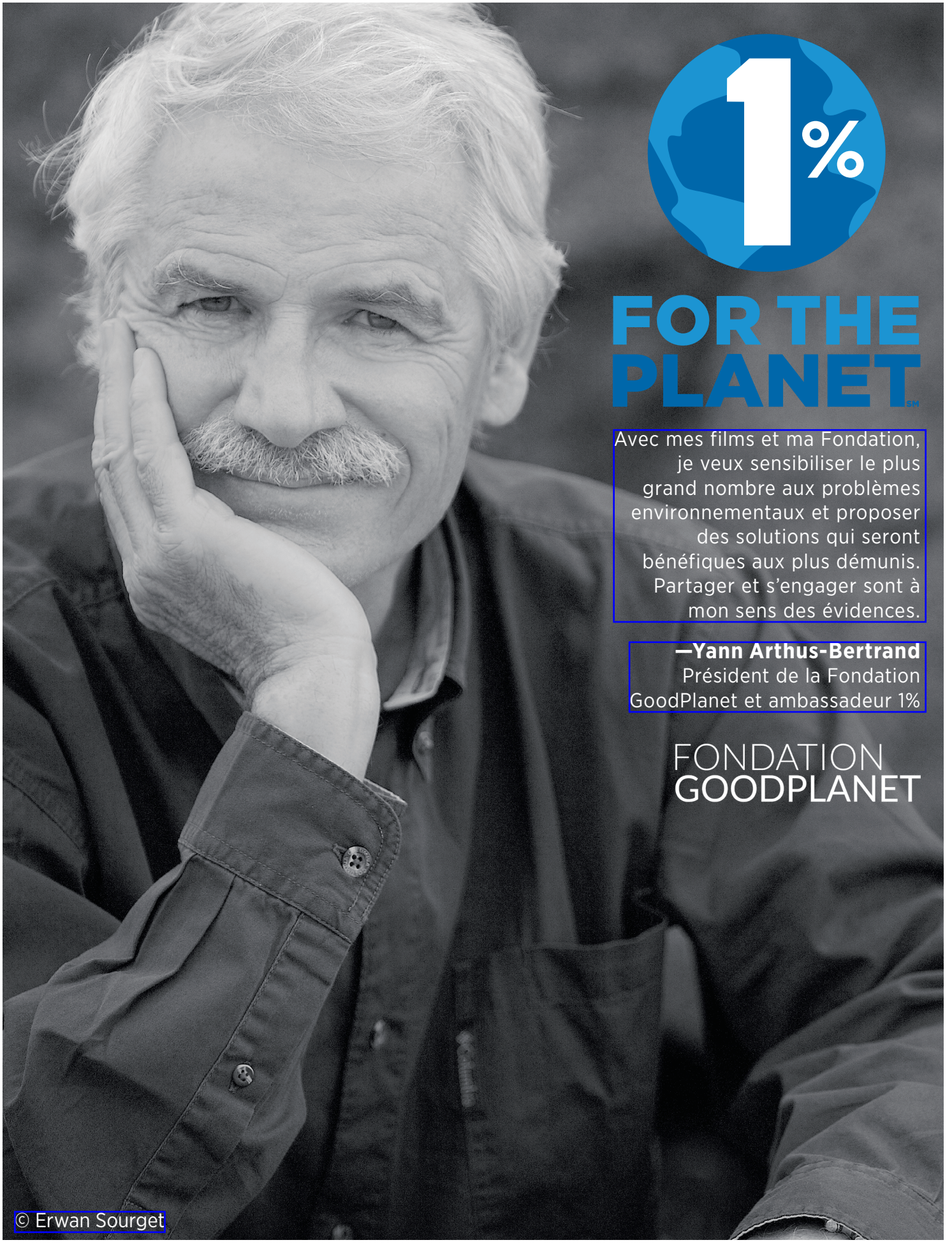
Ce n'est sans doute pas l'unique facteur de la vitalité actuelle du conspirationnisme dans le monde, mais si le sentiment d'absence de contrôle et de dépossession est bien une source de développement de ce mode de pensée, il y a tout lieu de s'inquiéter. En effet, un peu partout, l'idée de l'impuissance du monde politique paraît en vogue. Cette idée, à l'heure de la mondialisation des flux économiques, migratoires, informationnels, etc., n'est pas forcément déraisonnable et elle inspire logiquement des propositions politiques visant à rétablir une forme de contrôle sur ces flux en misant sur l'affirmation de la souveraineté nationale. L'esprit humain accorde une valeur psychologique à l'illusion de contrôle, comme l'a montré Ellen Langer, professeure de psychologie à Harvard, dans une fameuse expérience de 1975 où les sujets souhaitaient revendre des billets de loterie bien plus cher lorsqu'ils les avaient choisis eux-mêmes que lorsque ces billets leur avaient été arbitrairement attribués.

Il ne m'appartient pas de juger ici ces propositions politiques, mais qu'il me soit permis de considérer qu'elles sont à tout le moins des symptômes de ce sentiment de dépossession. La question est de savoir si celui-ci, au-delà du seul marché politique, ne favorise pas aussi les produits cognitifs qui nous narrent le fonctionnement du monde sur un mode paranoïaque.

On pourrait le craindre lorsqu'on découvre les résultats d'une enquête mentionnée par Brice Teinturier, le patron de l'institut de sondages Ipsos, dans son dernier livre *Plus rien à faire, plus rien à foutre – La vraie crise de la démocratie* (Robert Laffont, 2017). L'un des plus inquiétants au regard de ce que l'on vient de voir est sans doute le fait que 65 % des Français sondés déclarent être convaincus qu'aucun gouvernement n'est en mesure de réussir dans ses actions, et ce à quelques semaines d'échéances électorales importantes pour notre pays et au-delà. ■

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

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017



+1 Yann Arthus Bertrand soutient 1% for the Planet, réseau d'entreprises philanthropes consacrant 1% de leur chiffre d'affaires à des associations environnementales.

www.onepercentfortheplanet.org

1% FOR THE PLANET

La guerre de Troie a bien un lieu

Ernst Pernicka, Peter Jablonka et Magda Pieniążek



L'ESSENTIEL

- Durant l'Antiquité gréco-romaine, la ville d'Ilion passait pour avoir été la Troie homérique.
- Les archéologues confirment qu'une florissante cité de l'âge du Bronze a précédé l'Ilion gréco-romaine.
- Deux périodes de cette cité, notées Troie VI (vers – 1300) et Troie VIIa (vers – 1200), pourraient correspondre à celle de la guerre de Troie de *L'Iliade*.
- Même si la réalité de la guerre de Troie n'est pas établie, cette ville a été souvent menacée.

La ville de Troie mentionnée par Homère a-t-elle existé ? Il semble que oui. Et ses vestiges, qui datent de l'âge du Bronze, présentent même des traces de destruction. La guerre de Troie, un mythe ancré dans une réalité ?

LE SITE DE LA CITÉ DE TROIE évoquée par Homère correspond vraisemblablement à l'Ilion de l'Antiquité gréco-romaine, située à l'entrée du détroit des Dardanelles. La ville, dont les ruines occupent aujourd'hui la colline turque d'Hissarlik, était à l'âge du Bronze une florissante cité, avec une acropole fortifiée et une ville basse.



© Christoph Haussner

La guerre de Troie a-t-elle eu lieu ? Oui, si l'on accorde foi au « poème d'Ilion », c'est-à-dire à *L'Iliade*, une œuvre attribuée à Homère, dont l'existence n'est même pas certaine. Ce qui est sûr, c'est que pour les Grecs de l'époque classique, aux Ve et IVe siècles avant notre ère, et pour les Romains, *L'Iliade* et *l'Odyssée* n'étaient pas des fictions. Pour eux, l'assaut des Achéens sur la ville de Troie était un événement bien réel, qui avait marqué son époque.

Mais de quelle époque s'agirait-il ? Homère est réputé avoir vécu à la fin du VIIIe siècle avant notre ère. Or la langue grecque qu'il emploie est déjà archaïque pour ces temps-là. Le récit homérique, s'il en est un, aurait ainsi été élaboré au cours des siècles obscurs qui ont suivi la guerre de Troie. Et si cet événement est réel, il s'est déroulé bien avant, à l'âge du Bronze grec, à une époque où les grands empires hittite et égyptien existaient encore et où la culture mycénienne était à son apogée.

Premières fouilles en 1870

Pour autant, le texte d'Homère invite à l'enquête archéologique. Celle-ci fut lancée en 1870 par Heinrich Schliemann. Cet aventurier allemand avait entrepris de prouver le récit homérique en fouillant une colline formée par l'accumulation de couches archéologiques – ce que l'on nomme un tell. Nommée Hissarlik, cette colline se trouve à l'entrée du détroit des Dardanelles, dans la province turque de Çanakkale. Elle lui avait été indiquée par Frank Calvert, un Britannique vivant dans la région.

Depuis les découvertes initiales de Schliemann, les projets internationaux se succèdent à Hissarlik. C'est aujourd'hui une équipe de l'université de Tübingen qui y mène les fouilles internationales, sous la direction d'Ernst Pernicka (l'un des auteurs de cet article). Les découvertes de ces campagnes de fouilles complètent le dossier ouvert par Schliemann. Notamment, elles confirment que la cité sise à Hissarlik était bien la capitale de la Troade, région située à l'entrée du détroit des Dardanelles, depuis les débuts de l'âge du Bronze. Et elles montrent que cette cité souvent florissante a subi à plusieurs reprises des assauts guerriers, dont elle ne s'est remise que difficilement.

Si elle a eu lieu, la guerre de Troie remonte à un passé lointain. Schliemann a donc supposé que ses traces étaient profondément enfouies dans Hissarlik. C'est pourquoi il a fait creuser par des centaines d'ouvriers une tranchée large de 20 mètres à travers la colline. Troie I, la plus ancienne strate archéologique, est posée sur le socle rocheux. Elle ne contenait que les restes d'un modeste village, qui aurait été occupé vers 3000 avant notre ère. Troie II, juste au-dessus de Troie I, contenait les murs d'une fortification détruite par un incendie et de spectaculaires objets d'or, que Schliemann nomma le « trésor de Priam », Priam étant le roi de Troie dans le récit homérique. L'aventurier-archéologue s'est alors cru parvenu au but, mais nous savons aujourd'hui que ce trésor est antérieur d'environ un millénaire à la possible Troie d'Homère.

Schliemann a sans doute pris conscience de son erreur après avoir aussi fouillé la ville de Mycènes, résidence d'Agamemnon, le roi des Achéens selon Homère. Schliemann a dû se rendre compte que les objets qu'il y a découverts diffèrent nettement de ceux de Troie II, de sorte qu'ils ne peuvent être de la même époque qu'eux.

Après son retour à Hissarlik, Schliemann découvrit en revanche de la céramique mycénienne dans la strate Troie VI, qui recouvre la période allant de 1750 à 1300 avant notre ère. C'est pourquoi son collaborateur puis successeur Wilhelm Dörpfeld estima que la guerre de Troie n'avait pu que s'inscrire dans la strate Troie VI. Pour sa

LES AUTEURS



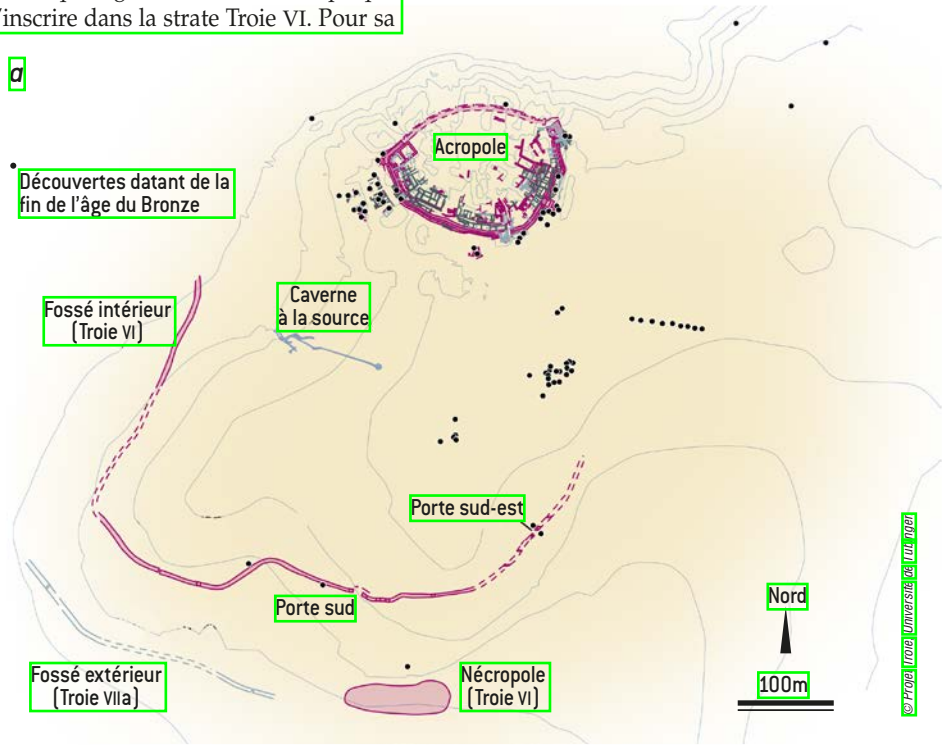
Ernst PERNICKA, archéomètre à l'université de Heidelberg, a dirigé les fouilles de Troie entre 2006 et 2013.



Peter JABLONKA, archéologue à l'université de Tübingen, participe aux fouilles de Troie depuis 1987.



Magda PIENIAZEK, archéologue à l'université de Tübingen, participe aux fouilles de Troie depuis 1999.



© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

part, Carl Blegen, un archéologue américain qui fouilla Hissarlik dans les années 1930, crut identifier les restes de la forteresse du roi Priam dans l'horizon temporel juste supérieur : Troie VIIa, une strate qui couvre les années allant de 1300 à 1200 avant notre ère. Qu'en est-il vraiment ? Afin de comparer ces deux hypothèses, il nous faut maintenant reprendre patiemment les faits les uns après les autres.

Pour commencer, le récit homérique ne peut laisser indifférent quiconque fouille à Hissarlik, car il reconnaîtra immédiatement le paysage décrit par le poète avec ses fleuves, ses collines et ses îles en avant de la côte. Quelques détails du récit diffèrent bien de la réalité visible autour d'Hissarlik, mais, comme l'écrivit Schliemann : « Homère étant un écrivain et non un historien, ses exagérations doivent être excusées. » Aussi critiques soient-ils, tous les archéologues qui lui ont succédé parviennent à la même conclusion : Hissarlik correspond à la description du cadre de la guerre de Troie. Il n'y a donc aucune raison de chercher ailleurs la ville de Priam.

Il y eut pourtant des tentatives en ce sens dès l'Antiquité, mais on peut les attribuer au patriotisme d'autres cités. Ainsi, le géographe Strabon (environ – 63 à 23) écrivit que la ville grecque nommée Ilion et se trouvant à l'entrée des Dardanelles ne correspondait pas à l'Ilion d'Homère (rappelons que dans le récit d'Homère, les noms Ilion et Troie sont synonymes). L'ancienne capitale des habitants de la région – les Iliens – se trouvait selon lui plus à l'intérieur des terres. Il citait à l'appui de ses affirmations celles de l'érudite Hestaia, d'après qui la plaine située en avant de l'Ilion de l'âge classique n'était apparue qu'après la guerre de Troie. Les armées grecque et troyenne ne pouvaient donc pas y avoir combattu. Les études géologiques les plus récentes confirment le remplissage progressif de la baie, mais n'excluent pas qu'il ait déjà existé un espace suffisant face à Hissarlik à l'âge du Bronze. Or Hestaia était originaire d'une ville concurrente de l'Ilion grecque…

Wilusa, la Troie hittite ?

Afin d'être absolument sûr du lien entre Troie et Hissarlik, il faudrait découvrir dans ce tell une tablette d'argile datant de l'âge du Bronze et portant le nom de l'endroit. C'est malheureusement peu probable, dans la mesure où aucune découverte de ce genre ne s'est produite dans toute l'Anatolie occidentale. On peut se demander pourquoi. N'y avait-il aucune administration utilisant l'écrit dans cette région ? Difficile de savoir. Il est possible que les scribes aient travaillé sur des supports périssables. Dans l'épave d'Uluburun, datant de l'âge du Bronze et exceptionnellement bien préservée sous la boue marine, les archéologues ont retrouvé un exemple d'un tel support : une tablette de bois recouverte de cire.

Le seul artefact inscrit jamais découvert à Troie est un sceau de métal portant des hiéroglyphes de l'une des langues pratiquées au sein de l'empire hittite : le louvite. Ces hiéroglyphes forment le nom d'une femme et celui d'un scribe *(voir la photographie ci-dessous)*. Cet objet est tellement usé qu'il pourrait être antérieur à la strate Troie VIIb dans laquelle il a été découvert et qui couvre les années allant d'environ 1200 à 1050. Vers le XIIIe siècle avant notre ère, les sceaux de ce genre étaient employés dans tout l'empire Hittite, où le louvite était alors très répandu. Les archéologues en ont découvert jusqu'en Grèce, de sorte que sa présence à Hissarlik ne prouve guère un contact entre les Hittites et la ville, ni que l'on y parlait le louvite.

Afin de compenser le manque d'archives écrites à Hissarlik, les chercheurs se sont tournés vers celles de Hattusa, la capitale hittite. On a en effet remarqué depuis longtemps que certains toponymes et noms de personnes mentionnés dans les textes cunéiformes de ces archives ressemblent à ceux cités par Homère. Ainsi, Taruissa rappelle Troie, Wilus(ij)a rappelle (w)Ilios c'est-à-dire Ilion, le nom d'empire Ahhiyawa rappelle celui des Achéens du mythe (des variantes de lecture sont notées entre parenthèses). Les spécialistes des Hittites sont malheureusement incapables de situer ces toponymes, à l'exception de Wilusa, que plusieurs placent dans le nord-ouest de l'Asie mineure. Il est ainsi plausible que ce nom désigne Troie, même si cette identification n'est pas prouvée.





LA CARTE ARCHÉOLOGIQUE d'Hissarlik *(a)* révèle les fossés défensifs successifs de la basse ville au cours des périodes Troie VI *(en rouge)* et Troie VIIa *(en bleu)* ; diverses structures de l'âge du Bronze, telle l'acropole, la Maison de la terrasse, la Caverne à la source ou encore une nécropole sont aussi indiquées. Un tronçon du premier fossé défensif est visible sous les murs d'époque gréco-romaine sur lesquels se tient cet archéologue *(b)*. Un sceau *(c)* portant des hiéroglyphes louvites *(ci-dessus)* a été découvert dans la strate Troie VIIb. Il constitue à ce stade la seule inscription jamais découverte à Troie. Cette inscription consiste en deux noms, celui d'un scribe et celui d'une femme.

© Projet Troie, Universität Tübingen

Les textes hittites montrent que Wilusa était une cité indépendante, mais incluse dans la sphère d'influence hittite. Vers 1400, la cité s'était associée sans succès à un mouvement de révolte. Dans les années 1300, Wilusa et toute la côte occidentale de l'Asie mineure ont subi les attaques incessantes d'un certain Piyama-Radu. Ce guerrier était membre de la dynastie du royaume d'Arzawa et un allié du roi d'Ahhiyawa. Pour se protéger, Alaksandu, le souverain de Wilusa, passa avec le roi hittite Muwatalli II un contrat qui lui coûta une partie de son autonomie : Wilusa devint un État vassal de l'empire hittite, qui ne pouvait donc plus avoir de politique étrangère indépendante.

Manifestement, Piyama-Radu ne se laissa guère impressionner par cette alliance, ce que trahit de façon indirecte une lettre : vers 1250, le roi hittite Hattusili III écrivit au roi d'Ahhiyawa qu'en ce qui concernait Wilusa, « on était désormais d'accord ». Il lui demandait de bien vouloir le faire savoir à Piyama-Radu. Une cinquantaine d'années plus tard, le lieu apparaît une dernière fois dans la correspondance impériale hittite : Walmu, le roi de Wilusa, venait d'être destitué, de sorte que l'empereur hittite essayait de le remettre sur le trône. Peu après, la capitale hittite Hattusa elle-même sombra et avec elle ses échanges diplomatiques.

L'étude des autres cultures de l'âge du Bronze pratiquant l'écriture ne nous mène guère plus loin. Certes, on découvre aussi des noms de lieux ou de personnes dans les documents rédigés en linéaire B de la Grèce mycénienne ainsi que dans les textes égyptiens, et certains ressemblent à ceux qui sont évoqués dans les mythes homériques. Toutefois, ces écrits ne prouvent pas l'existence de ces endroits ou de ces personnes pendant l'âge du Bronze. Un certain Achille apparaît ainsi dans les textes en linéaire B, mais il s'agit d'un berger et non du héros légendaire.

Qui plus est, les particularités des divers systèmes d'écriture compliquent la mise en équivalence d'un même nom entre un système et un autre : l'égyptien ne comportait que des consonnes, tandis que le mycénien (noté en linéaire B), le hittite (noté en cunéiforme) et le louvite (noté en hiéroglyphes) étaient des langues consonantiques. Les mêmes termes ne se prononçaient donc pas forcément de la même façon dans ces différentes langues.

Quant aux fouilles, elles aussi ne livrent hélas que des indices. Ceux-ci racontent l'histoire passionnante d'une région qui cherchait à survivre malgré les pressions des grandes puissances voisines. Cependant, les dernières recherches prouvent un point essentiel : la capitale de la région pendant l'Antiquité, l'Ilion gréco-romaine, est bien la continuation de la capitale régionale depuis les débuts de l'âge du Bronze. On peut donc exclure qu'une cité d'importance comparable – une autre Troie possible – ait existé dans le voisinage.

Les strates du site d'Hissarlik

Les fouilles de ce site, que l'on identifie avec Troie, ont révélé plusieurs couches d'occupation, notées de la plus ancienne à la plus récente.

- **Troie I : d'environ 3200 à 2500 avant notre ère**
- **Troie II : de 2500 à 2200**
- **Troie III : de 2200 à 2000**
- **Troie IV : de 2000 à 1900**
- **Troie V : de 1900 à 1750**
- **Troie VI : de 1750 à 1300**
- **Troie VII : de 1300 à 1050**
- **VIIa : de 1300 à 1200**
- **VIIb1 : de 1200 à 1150**
- **VIIb2 : de 1150 à 1050**

Troie VI, ville fortifiée et opulente

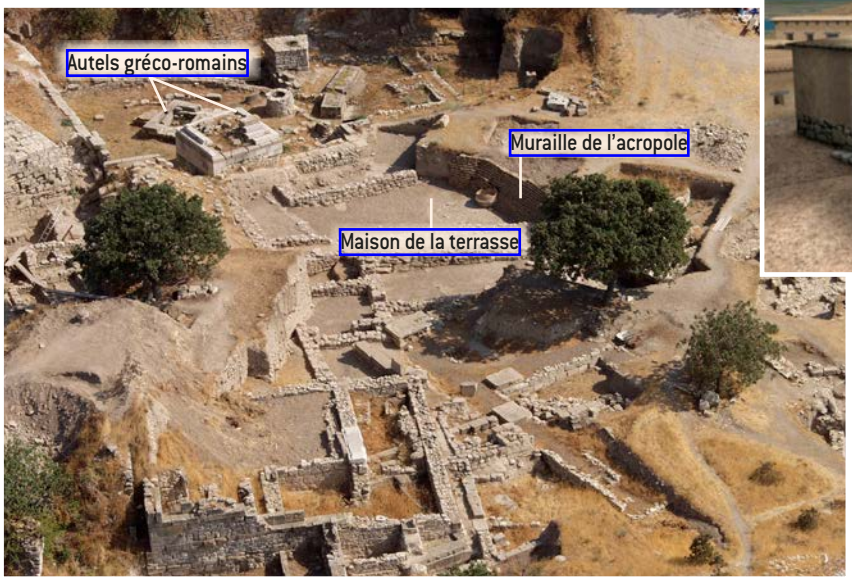
Un autre fait va dans le sens de faire d'Ilion la Troie homérique : la cité craignait les attaques. Depuis 1600 environ, donc environ un millénaire après la première occupation, Troie VI a entouré de remparts son acropole. Les tailleurs de pierre qui ont édifié ces murs ont si bien travaillé qu'aujourd'hui encore ils se dressent sur 6 à 7 mètres de haut. L'opulence de Troie VI se lit aussi à l'intérieur de l'acropole : les rangées de cases de l'époque précédente sont remplacées par de grands bâtiments indépendants assis sur de puissantes fondations de blocs taillés. Certains faisaient 20 mètres de long et comportaient plusieurs étages. Il s'agit manifestement des maisons de l'élite sociale de la ville.

Autre signe qui ne trompe pas : le terrain enclos par les fortifications avait été nivelé. Cet énorme travail ne peut être que le fait d'une autorité assez puissante pour obtenir la considérable main-d'œuvre nécessaire. Malheureusement, la strate supérieure de ce terrassement est détruite ou a disparu au cours des fouilles de Schliemann. Il est aussi possible qu'elle ait été retirée durant

CE VASE MYCÉNIEN a été mis au jour dans la Maison de la terrasse *(voir l'illustration page suivante)*. Il prouve l'existence de relations commerciales entre la cité découverte à Hissarlik et la Grèce mycénienne, vers 1300 avant notre ère.



© Trustees of the University of Pennsylvania, Gerard Gorman





© Photo Peter Jablonski, Berlin, Germany

LA MAISON DE LA TERRASSE
(à gauche et ci-dessus sa reconstruction) prouve la présence d'habitants aisés dans la basse ville de la période Troie VII (1300 à 1050 avant notre ère). Édifiée non loin de la muraille de l'acropole, elle comportait plusieurs pièces, dont une grande entrée, une pièce donnant sur plusieurs pièces attenantes et un sanctuaire domestique sur l'arrière.

l'Antiquité, lorsque l'acropole de Troie fut transformée en un sanctuaire à Athéna. Les rampes et routes qui subsistent prouvent toutefois que des bâtiments importants se trouvaient au centre de la forteresse.

Une basse ville flanquait l'acropole de Troie VI. Très dense près des remparts, elle le devenait progressivement moins au-delà de 200 mètres des murailles, où de vastes espaces séparaient maisons et ateliers. Un fossé défensif creusé dans le roc découvert en 1988 délimite le périmètre de la basse ville. Large de 4 mètres et profond de 2, il a disparu par endroits pendant l'Antiquité. Même si pour le moment les recherches n'ont pas révélé où il se terminait, il est clair qu'il mesurait plus de 1 kilomètre de long. Après 1500 avant notre ère, il protégeait une ville basse étendue sur 20 à 30 hectares.

On peut supposer qu'en retrait de ce fossé s'élevait un rempart édifié avec les matériaux déblayés. Une palissade le renforçait sans doute. Des trous ont été mis en évidence dans certaines des parties fouillées, où, peut-on supposer, étaient ancrées les bases d'un portail de bois. Trois portes de la ville ont pu être mises en évidence par des interruptions du fossé.

Les habitants de Troie VI avaient aussi fait de grands efforts pour alimenter en eau tant la citadelle que la ville basse. Plusieurs puits ont été creusés dans l'acropole jusqu'à la nappe phréatique. L'un d'eux était protégé par le « bastion nord-est » de la muraille. Dans la ville basse, un système de galeries donnait accès à une source située dans une grotte : la « caverne à la source » *(voir le plan page 24)*. La source en question devait être à l'origine un filet d'eau sortant de la roche, que l'on aura remonté en creusant la roche toujours plus loin.

Dans une nécropole découverte hors de la ville, les archéologues ont trouvé de la céramique importée depuis la Grèce mycénienne *(voir la photographie page précédente)*. Deux urnes contenaient même du verre, de la faïence, des objets en ivoire et des perles d'or et de coralline : manifestement, les défunts de Troie VI avaient un bon niveau de vie ! Des biens d'importation de même type se retrouvent sous la forme de fragments dans l'acropole à l'époque finale de Troie VI. On y a aussi trouvé des coupes à base d'œuf d'autruche et des poignées d'épée en pierre. Autant de découvertes qui témoignent de contacts lointains.

Une puissante principauté

Ainsi, le style du bâti, les échanges commerciaux au long cours et la présence de biens d'importation soulignent l'importance de la ville, qui était manifestement une capitale régionale depuis les débuts de l'âge du Bronze. Un statut que confirment ses dimensions, puisqu'elle est au moins deux fois plus grande que les agglomérations des environs. La cité concentrait les fonctions – une organisation politique, un contrôle des surplus agricoles, des artisans spécialisés, un commerce au long cours –, ce qui empêchait sans doute les cités voisines de se développer.

En fin de compte, nous voyons que la cité installée sur la colline qui allait devenir Hissarlik était une puissante principauté. Les sociétés de l'âge du Bronze étaient typiquement des sociétés lignagères à aristocratie guerrière. La population non aristocratique vivait dans la basse ville ou dans les environs, tandis que l'acropole était largement réservée à l'élite aristocratique. Les maisons isolées à rez-de-chaussée sans fenêtres font penser aux tours des familles de notables des villes médiévales : il semble clair que chacun devait se défendre lui-même. Peut-on voir là un indice du fait que la question du pouvoir n'avait pas encore été tranchée en faveur d'une dynastie stable ?

Quoi qu'il en soit, vers 1300 avant notre ère, la cité Troie VI a été détruite. Dörpfeld a interprété les traces d'incendie qui l'attestent, sur l'acropole et dans la basse ville, comme des traces de guerre. C'est la raison pour laquelle cet archéologue a assimilé la strate Troie VI à la Troie d'Homère.

Mais ce n'était pas l'avis de Blegen. Selon ce dernier, les murailles fissurées, les murs abattus ou renversés de la fin de Troie VI sont la conséquence d'un tremblement de terre. Une théorie douteuse, nous semble-t-il, car après une telle catastrophe naturelle, on s'attendrait à observer une continuité de l'occupation, ce qui n'est pas le cas. En effet, après une telle catastrophe, les habitants d'une ville reprennent leur vie normalement. Or ce n'est pas ce qui se passe après Troie VI : les murailles de la citadelle n'ont pas été restaurées ; les

tours et portails ont été modifiés, voire agrandis. A-t-on profité de la nécessité de réparer pour mettre en œuvre des plans échafaudés depuis longtemps ? Ou a-t-on plutôt fait face à une menace aiguë ?

En outre, de grands changements sont intervenus dans l'acropole : les maisons fortifiées isolées ont disparu ; à la place, tout un maillage serré de petites maisons à une ou deux pièces serrées a envahi la surface où s'élevaient auparavant les grandes bâtisses aristocratiques. Toute une série de maisons appuyées sur les murailles enserrait l'espace intérieur de l'acropole. De grandes jarres – des *pithoi* – étaient enterrées dans le sol de beaucoup de ces modestes maisons : manifestement, constituer des réserves était devenu important.

Le caractère minimaliste de ce bâti a poussé Dörpfeld à supposer que la citadelle n'abritait plus le souverain et sa parenté, mais plutôt de simples citoyens. Blegen, lui, pensait que Troie se blottissait désormais derrière ses murs dans l'attente d'une attaque, hypothèse qui satisfait trop son désir de prouver le caractère historique du récit homérique.

De fait, les fouilles les plus récentes contredisent la thèse de Blegen. À l'époque de Troie VIIa, la ville basse n'était pas dépeuplée. Au contraire, on y construisait plus densément, parfois même avec des murs mitoyens. À la fin de la période de Troie VI ou au début de celle de Troie VIIa, le fossé défensif a été comblé. Un nouveau fossé a été creusé dans la roche plus de 100 mètres plus loin. Son parcours ne peut qu'être partiellement restitué, car pendant la période gréco-romaine, l'établissement d'une carrière à l'est de la ville l'a détruit. Il est cependant clair qu'au début de Troie VIIa, la ville avait dépassé sa taille initiale et couvrait désormais 30 hectares ou plus.

L'étude des sols de cette époque par les archéobotanistes montre en outre que les habitants de la ville se sont mis à cultiver des terrains plus élevés et plus secs, et pas seulement ceux de la vallée du Scamandre (le fleuve évoqué par Homère) comme auparavant. L'agriculture se développait donc. Aujourd'hui, nous pensons que les *pithoi* des maisons de l'acropole ne servaient pas à garder des réserves en prévision d'un éventuel siège, mais plutôt à contrôler les excédents. Les biens d'importation démontrent que des relations commerciales s'étaient établies avec la Grèce mycénienne et la Méditerranée orientale ; on s'était mis aussi à produire des objets de style mycénien dans la ville. Des fouilles à Chypre et au Levant ont montré que l'on exportait en outre de la « céramique grise d'Anatolie occidentale » *(voir la photographie page 30)*. En plus d'une industrie textile, la ville avait désormais une industrie métallurgique, ce que documentent les moules retrouvés.

La hiérarchie sociale manifestée par les résidences de familles aristocratiques à l'intérieur de l'acropole de la Troie VI n'existait plus. Pourquoi ? On l'ignore, mais l'idée de Dörpfeld selon laquelle de simples citoyens habitaient l'acropole est exagérée : une forte muraille continuait à séparer les habitants de la citadelle de ceux de la ville basse. Une maison de la ville basse de cette période – la Maison de la terrasse *(voir l'illustration page 27)* – illustre que d'autres gens que de simples paysans ou artisans habitaient hors de l'acropole. Sa structure est en effet bien plus compliquée que celle des autres bâtiments de la ville basse : elle comportait un hall d'entrée pavé de pierres plates, une pièce principale dotée d'un foyer et des pièces attenantes contenant des jarres de stockage. Le sceau minoen (crétois), les bijoux, le pot en forme de taureau et la statuette de bronze découverts dans une petite pièce située à l'arrière du bâtiment suggèrent un sanctuaire domestique.

Malheureusement, la plus grande partie de la ville basse de la période Troie VIIa se trouve sous l'Ilion gréco-romaine. Nous n'avons pour le moment aucune nécropole datant de Troie VII qui pourrait nous renseigner sur la société troyenne. Notons cependant que des produits d'importation, de la céramique mycénienne ou des perles de faïence par exemple, ont été retrouvés dans les couches archéologiques de la basse ville de cette période.

Une modeste découverte nous fournit un vague indice sur la société locale pendant cette période : une série de stèles mesurant jusqu'à deux mètres de haut dressées devant la porte sud. Ce genre de pierre sans sculpture ni décoration caractérise en effet les lieux de culte d'époque hittite. S'agit-il là d'une trace archéologique à mettre en rapport avec les mentions de Wilusa dans les tablettes hittites ? Dans le contrat d'Alaksandu en effet, les dieux de Wilusa sont pris à témoin. Le nom de l'un d'eux, *...appaliuna* (les signes commençant le mot ne sont pas conservés), rappelle Apollon qui, selon Homère, avait pris parti pour les Troyens. Il est possible que les stèles aient été une marque de révérence à ce dieu. Une autre divinité nommée KASKAL.KUR (les majuscules traduisent la transcription de certains idéogrammes) était liée, selon les experts, aux écoulements souterrains d'eau, ce qui pourrait correspondre à la caverne-source.

Des pointes de flèches ont été découvertes tout autour de la Maison de la terrasse ainsi qu'en d'autres endroits de la basse ville. Les indices caractéristiques d'une attaque ? C'est possible, mais pourquoi alors n'en a-t-on retrouvé qu'une seule dans la citadelle ? Certains chercheurs supposent que la basse ville aurait empêché de tirer directement sur la citadelle en augmentant la distance à franchir. Et malheureusement, la forme des pointes de flèches ne permet pas de les associer à une culture, par exemple à celle de Mycènes.

Des tas de petites pierres trouvés dans la basse ville constituent aussi des indices

Des pointes de flèches ont été découvertes tout autour de la Maison de la terrasse ainsi qu'en d'autres endroits de la basse ville

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

de guerre, car on les interprète comme des projectiles de fronde préparés pour défendre la ville. Leur taille peut certes faire penser à cet usage, mais les projectiles de fronde typiques de l'âge du Bronze – en plomb ou en céramique –, avaient une forme ovale appointée. Trouvée dans une maison derrière la porte 6, une réserve de ces projectiles prouve que dans la ville de l'époque Troie VI, on en utilisait aussi.

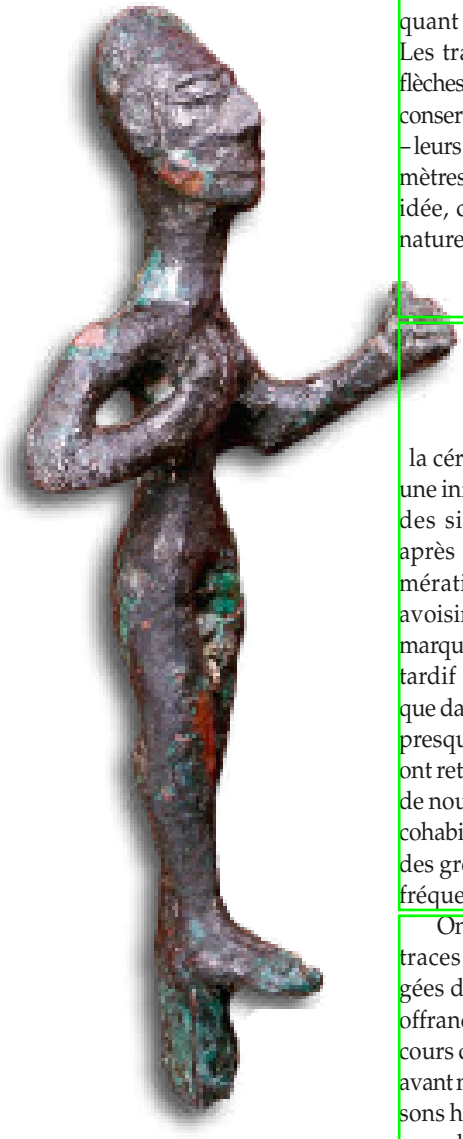
Même si cette vision d'ensemble de la Troie VIIa semble hétérogène, les destructions massives constatées suggèrent des événements guerriers. Peu après 1200, pendant la phase Troie VIIb1, on ne procéda pratiquement à aucune réparation, ni à la construction de nouveaux bâtiments. Cela donne l'impression que la population était décimée, situation peut-être due à une guerre ou à une épidémie.

Un choc surmonté au bout d'un demi-siècle

Ce n'est qu'au bout d'un demi-siècle que la ville a surmonté le choc. Au cours de la phase notée Troie VIIb2, qui va à peu près de 1150 à 1050, de nouvelles maisons sont apparues partout dans la citadelle ; certaines intégraient les ruines des anciennes. Leurs implantations étaient souvent irrégulières et elles comportaient fréquemment plusieurs pièces, parfois disposées autour d'une cour. La construction était si serrée qu'il subsistait très peu de place pour des ruelles.

En dehors de l'enceinte de la citadelle, on a aussi construit des bâtiments, certains appuyés sur la muraille, auxquels on accédait manifestement depuis le toit. Nous les interprétons comme des entrepôts. Comme le niveau du sol autour des remparts s'était élevé du fait des décombres, la muraille a été rénovée et agrandie. Certaines des portes n'étaient plus en usage, mais la porte sud, avec sa route pavée, a été entretenue.

Il est intéressant de noter l'apparition d'un nouveau type de céramique lors de la phase Troie VIIb1. Produite sans tour de potier, cette « céramique barbare » *(voir la photographie page 30)*, comme la céramique à mamelons de la phase Troie VIIb2, rappelle le style et l'ornementation de la céramique des Balkans du sud que l'on employait depuis le bas Danube jusqu'en Thrace du sud. Une telle innovation implique une évolution des façons de manger et de boire. Les céramiques indigènes typiques de Troie VI ne disparurent pas complètement, de même que celles de style mycénien, mais la présence de nombreux éléments étrangers montre que de nouvelles populations ont dû arriver.



CETTE STATUETTE DE BRONZE a été trouvée dans l'une des pièces de la « Maison de la terrasse » et était accompagnée d'autres objets qui suggèrent un usage cultuel.

Abandon de la ville après 1050

Le renouveau de la ville n'a cependant pas duré longtemps. Après 1050, la citadelle a été abandonnée, quelques maisons mises à part. Et une fois de plus, le site ne nous fournit pas de réponses claires quant aux causes de cette désaffection. Les traces d'incendie et les pointes de flèches suggèrent une guerre, mais l'état de conservation des maisons de cette époque – leurs murs mesurent parfois encore deux mètres de haut – va à l'encontre de cette idée, comme à celle d'une catastrophe naturelle. Il semble donc que la plupart des habitants de la citadelle sont simplement partis.

Quelques-uns sont restés et ont entretenu leurs maisons. Une nouvelle ère débuta, qui se lit dans la vaisselle ordinaire : de la céramique protogrecque, qui atteste une influence culturelle hellène au cours des siècles obscurs qui commencent après 1200. Dans les débris de l'agglomération, cette vaisselle protogrecque avoisine la céramique traditionnelle et marque la transition entre l'âge du Bronze tardif et l'âge du Fer. Tant dans la ville que dans son voisinage, c'est-à-dire sur la presqu'île de Gallipoli, les archéologues ont retrouvé les traces d'usages locaux et de nouvelles coutumes, ce qui prouve la cohabitation des populations locales avec des groupes immigrés – un phénomène fréquent dans la région.

On trouve au sud de la muraille les traces d'un sanctuaire : cercles et rangées de pierres, et fosses contenant des offrandes. Ce sanctuaire sera agrandi au cours des siècles suivants. Au VIII^{e} siècle avant notre ère apparaissent quelques maisons hors de la citadelle. Mais on ignore quand a été fondée l'Ilion gréco-romaine.

En somme, qu'avons-nous appris ? Aujourd'hui, nous sommes sûrs que la cité occupant le tell d'Hissarlik était à l'âge du Bronze la capitale de la région. Toujours très fortifiée, son acropole a été

© Troia, Troie, Universität Tübingen





DE LA CÉRAMIQUE d'Anatolie occidentale *(ci-dessus à droite)* était exportée par la ville de Troie après la catastrophe de la fin de Troie VI (vers 1300 avant notre ère). La cité s'est à nouveau dépeuplée vers 1200. On y a ensuite commencé à produire de la « céramique barbare » *(ci-dessus)*. Parce que la ville avait désormais de nouveaux habitants ?

souvent détruite, puis reconstruite de façon à la renforcer encore. À l'âge du Bronze final, la citadelle était entourée par une basse ville fortifiée elle aussi.

Un site qui présente de telles caractéristiques correspond bien aux descriptions d'Homère. Mais si cette cité peut être identifiée à la Troie de *L'Iliade*, la guerre de Troie a-t-elle pour autant eu lieu ? Nous ne pouvons aujourd'hui en être sûrs. D'après les données archéologiques, l'idée qu'une telle guerre correspondrait à la fin de Troie VIIb (vers 1050 avant notre ère) semble improbable. En revanche, on ne peut écarter la possibilité qu'une guerre ait éclaté et détruit la ville vers 1300 (fin de Troie VI) ou vers 1200 (période Troie VIIa).

Une possible guerre vers 1300 ou vers 1200

Si l'on prend en compte les sources hittites et que l'on identifie Wilusa avec l'Ilion d'Homère, alors un conflit entre les Mycéniens et des Troyens alliés des Hittites est envisageable vers la fin de Troie VIb et la fin de Troie VIIa. La dernière option possible placerait la guerre de Troie après la chute de la civilisation mycénienne (vers 1100 avant notre ère), à laquelle appartenaient les attaquants supposés de Troie.

Plusieurs spécialistes de la culture mycénienne pensent que les événements décrits par Homère, s'ils sont réels, se seraient déroulés vers 700 avant notre ère. Ils avancent deux arguments pour l'affirmer. D'une part, les descriptions contenues dans *L'Iliade* et *L'Odyssée* correspondent avant tout à l'âge du Fer. D'autre part, selon eux, une tradition orale ne se maintient en général guère plus de trois générations.

Ces arguments ne nous convainquent pas. On sait bien en effet que dans de nombreuses cultures récentes, des bardes entraînés transmettaient des épopées datant de plusieurs siècles. Il s'agit de récits d'âges variés, qui ont été entremêlés en fonction des désirs et des conceptions du public auquel ils étaient destinés. Le récit des origines du groupe et de ses actions lointaines y domine toujours. D'autres éléments s'ajoutent, tels des idéaux, des valeurs associées, des liens de parenté, des éléments religieux...

L'œuvre d'Homère présente aussi ces caractéristiques : elle regorge d'éléments historiques choisis parce qu'ils renforcent l'identité de ses destinataires. Ce même phénomène peut être mis en évidence partout où des sources indépendantes permettent d'étudier un mythe, qu'il s'agisse par exemple du chant des Nibelungen, interprété dans le cadre de nos découvertes sur les grandes migrations barbares, ou de l'Ancien Testament considéré à la lumière de l'archéologie et de l'histoire des Hébreux. Dans tous ces cas, les vérités historiques se mêlent à l'imaginaire.

De même, les conflits armés de l'âge du Bronze ont formé le germe des sagas grecques. Il est donc très hasardeux de vouloir accorder l'archéologie, les textes et les récits héroïques grecs. Certes, tant l'archéologie que les sources écrites se rapportent au même site et à peu près à la même époque, mais elles sont en réalité comme les deux faces d'une médaille : complémentaires, mais différentes. ■

BIBLIOGRAPHIE

E. Pernicka *et al.* (dir.), **Troia 1987-2012 : Grabungen und Forschungen III. Troia VI bis Troia VII**, Monographie *Studia Troica* n° 7, Habelt, Bonn, à paraître en 2018.

C. B. Rose, **The Archaeology of Greek and Roman Troy**, Cambridge Univ. Press, 2014.

J. Latacz, **Troy and Homer. Towards a Solution of an Old Mystery**, Oxford University Press, 2004.

C. Babin, **Rapport sur les fouilles de Monsieur Schliemann à Hissarlik**, *Comptes rendus des séances de l'Académie des Inscriptions et Belles-Lettres*, vol. 34, n° 4, 1890.

© Projet Troie Université de Tübingen Manfred Korfmann

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

Où lirez-vous la presse quand les ordinateurs auront disparu ?



Sur papier, certainement, et sur d'autres supports qui n'existent pas encore.

La presse a déjà beaucoup changé. C'est même le média qui a le plus évolué.
Aujourd'hui, vous êtes 95 % à nous lire sur papier au moins une fois par mois*.
Demain, pour vous accompagner, nous évoluerons encore. Mais ce qui ne changera pas, c'est la qualité du travail de nos journalistes. C'est et cela restera notre cœur de métier. Et nous trouverons toujours le moyen de vous rendre accessible une information de qualité qui vous procure du plaisir.
Notre évolution ne se fera pas sans votre avis, exprimez-le sur **demainlapresse.com**

POUR LA SCIENCE avec #DemainLaPresse
DEMAINLAPRESSE.COM

AUSTRALIE pour l'ACPM | FR 0 | Paris B 378 899 365 | Source : ACPM ONE 2015-2016

Agamemnon, roi des rois à Mycènes ?

Josef Fischer

Dans le récit d'Homère, le père d'Iphigénie est le chef des Grecs, le roi désigné pour mener l'expédition contre Troie. Ce héros mythique semble bien inspiré de personnages réels, ces princes mycéniens de l'âge du Bronze, bâtisseurs de palais-forteresses dans tout le monde égéen.

L'ESSENTIEL

- Entre 1450 et 1200 avant notre ère, en Grèce continentale, de grandes citadelles ont été érigées, dont la plus grande est celle de Mycènes.
- La plupart sont organisées autour d'un bâtiment central comportant un *megaron*, c'est-à-dire une salle de réception à colonnades, où se trouvaient un trône et un feu rituel.
- Selon la majorité des chercheurs, un *wanax* y siégeait et y exerçait l'autorité. Mais on ignore quel sens exact donner à ce terme : roi, roi des rois, grand prêtre ?

Qui était Agamemnon ? Homère nous dit qu'il fut le commandant en chef des Achéens, c'est-à-dire de l'ensemble des Grecs rassemblés devant Troie. Il nous dit aussi qu'à part Agamemnon et son frère Ménélas, pas moins de vingt-neuf « rois » menaient les guerriers au combat. Ainsi, à lire Homère, nous pouvons autant penser que les Achéens étaient sous la coupe d'Agamemnon, le « prince des peuples », que croire ce peuple dirigé par plusieurs chefs. Les spécialistes de la civilisation mycénienne tentent de clarifier la question du pouvoir au sein de cette culture. Comme nous allons le voir, toutes leurs discussions finissent par tourner autour d'une énigmatique notion : celle de *wanax*.

Pour Homère, Agamemnon était-il homme ou dieu ? Difficile à dire quand on lit le poète. Prenons par exemple ce passage du deuxième chant de *L'Iliade* : « Et la foule s'assit et resta silencieuse ; et le divin Agamemnôn se leva, tenant son sceptre. Hèphaistos, l'ayant fait, l'avait donné au roi Zeus Kroniôn. Zeus le donna au messager, tueur d'Argos ; et le roi Herméias le donna à Pélops, dompteur de chevaux, et Pélops le donna au prince des peuples Atreus. Atreus, en mourant, le laissa à Thyestès riche en troupeaux, et Thyestès le laissa à Agamemnôn, afin que ce dernier le portât et commandât sur un grand nombre d'îles et sur tout Argos. » Il suggère qu'Homère fait descendre Agamemnon du roi des dieux lui-même : Zeus ! Pour autant, à son origine, le terme *Agamémnôn* est une épithète que l'on accolait au nom du dieu suprême… La tradition mythologique l'a ensuite transformé en un nom de héros, ce qu'il semble



CE MASQUE mortuaire d'un guerrier mycénien a été découvert par Heinrich Schliemann. Il est connu sous le nom de masque d'Agamemnon.

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017



© Xuan Ohl

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

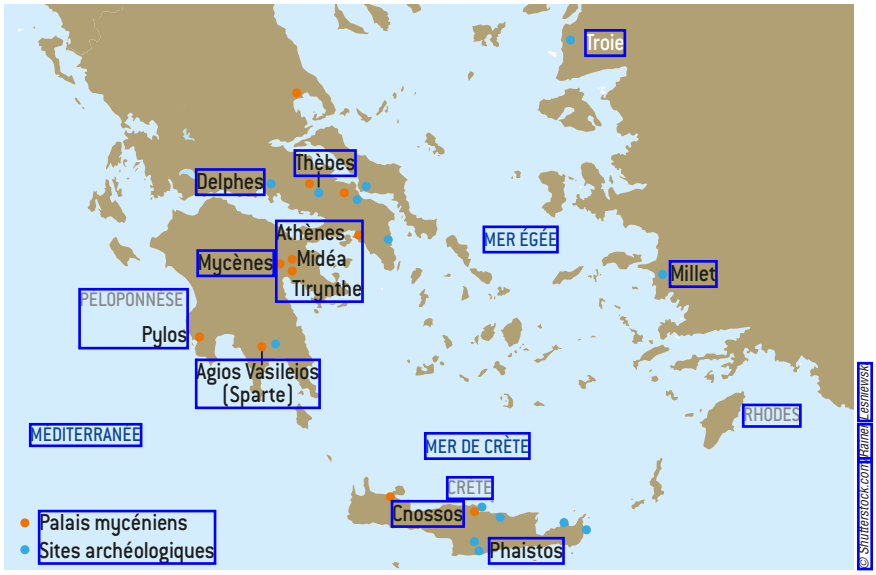
bien être : il résulte en effet de la fusion du préfixe de renforcement *ága*, qui signifie « beaucoup, très », avec le terme mémnon issu de *méno* qui signifie « rester, se tenir, tenir bon ». Il désigne donc « celui qui tient bon », bref un héros à la guerre…

Pour sa part, Homère aurait été un barde grec – un aède – bien postérieur à l'époque d'Agamemnon. S'il a existé, il aurait vécu à la fin du VIII[e] siècle avant notre ère. Quant à la guerre de Troie, elle n'a peut-être… pas eu lieu, mais selon de nombreux chercheurs, le récit d'Homère dériverait quand même de faits et d'événements réels, qui se seraient produits vers 1200 avant notre ère ou avant.

Quoi qu'il en soit, le fait qu'Homère dise d'Agamemnon qu'il commandait sur un grand nombre d'îles et sur tout Argos (une bonne partie du Péloponnèse) est notable, car cela suggère qu'il existait un roi prééminent chez les Achéens. Or ce clan homérique est sans doute une émanation mythologique de l'élite de l'âge du Bronze grec, celle de la civilisation mycénienne.

C'est ainsi que l'on nomme la culture qui, entre 1650 et 1100 avant notre ère, dominait la mer Égée et la Grèce continentale. Son apogée peut être situé entre 1400 et 1200 avant notre ère, de sorte que, peu de temps avant de disparaître, vers 1100 avant notre ère, elle était encore florissante. Point notable, la civilisation mycénienne est contemporaine de la civilisation minoenne, qui s'est épanouie entre 3000 et 1400 avant notre ère en Crète et dans les îles égéennes, dont celle de Santorin. En effet, à partir de 1400, des Mycéniens ont dominé la Crète, puisqu'un roi mycénien y a régné à Cnossos, sa capitale. On y parlait alors le mycénien, c'est-à-dire une forme archaïque du grec.

Les spécialistes de l'Antiquité ont longtemps tenu le récit homérique pour de la pure mythologie. Cette vision changea radicalement après que le pionnier de l'archéologie Heinrich Schliemann (1822-1890) eut identifié les vestiges vraisemblables d'Ilion, la ville évoquée par Homère *(voir l'article « La guerre de Troie a bien un lieu », pages 22 à 30)*. Cette cité, dont le nom se traduit par « Troie » en mycénien, se trouve à l'entrée du détroit des Dardanelles. Après Schliemann, on s'est mis au contraire à prendre le récit homérique à la lettre, ainsi que ceux des auteurs antiques qui avaient décrit la guerre de Troie. Parmi eux, le géographe Pausanias, après avoir beaucoup voyagé, écrivit au II[e] siècle de notre ère une sorte de guide de voyage en Grèce en dix tomes. C'est avec ce manuel sous le bras, en plus de *L'Iliade* et de *L'Odyssée*, que Schliemann partit vers 1874 à la recherche de la Mycènes d'Homère et la trouva. Ce fut donc aussi lui, qui, en livrant les premières connaissances solides sur la culture qui avait érigé Mycènes et d'autres citadelles, fonda la mycénologie et choisit le terme de « culture mycénienne ».



L'AUTEUR



Josef FISCHER est historien de l'Antiquité attaché à l'université de Salzbourg, en Autriche.



LES TABLETTES EN LINÉAIRE B, première forme d'écriture du grec, n'étaient pas cuites, de sorte que peu d'entre elles nous sont parvenues. Comme le montrent les traces de feu qu'elle porte, celle-ci fut cuite au cours de la destruction du palais de Pylos par un incendie vers 1200 avant notre ère. L'existence d'une écriture signifie-t-elle que la culture mycénienne était unifiée?

Citadelles à murs cyclopéens

Clairement, les citadelles entourées de murs cyclopéens, c'est-à-dire de murs de gros blocs jointifs, constituent le principal marqueur archéologique de la culture mycénienne. On trouve de telles citadelles en beaucoup d'endroits de la Grèce continentale et de l'île de Crète, et il arrive, par exemple à Pylos, dans le Péloponnèse, qu'elles soient dépourvues de murs cyclopéens.

Ces grandes structures palatiales sont organisées autour d'un ensemble de cours entourées de magasins, d'ateliers, d'appartements, de salles de réception et sans doute aussi de lieux de culte. Il est clair qu'elles constituaient des centres de pouvoir de l'âge du Bronze grec, même si l'on ignore si l'autorité qui s'y exerçait était celle d'un roi ou celle d'un haut fonctionnaire. Tout

© Sharon Mollerus

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017



S-V/Shutterstock.com

LA PORTE DES LIONNES est l'une des entrées de la citadelle de Mycènes, dans le Péloponnèse *(voir la carte page précédente)*. La représentation sculptée de deux lionnes de part et d'autre d'une colonne témoigne de la présence de lions tout autour de la Méditerranée pendant l'Antiquité. L'enceinte cyclopéenne, dont cette porte est l'un des éléments, sugère l'existence de familles règnantes.

naturellement, les découvreurs des citadelles mycéniennes les ont associées aux palais évoqués dans l'épopée homérique. Même si, dans certaines régions grecques, on n'a pas découvert de citadelles, il est clair que leurs habitants vivaient sous l'influence d'un palais-État. Trop d'indices en attestent en effet, par exemple des sceaux. Le territoire dominé par une citadelle mycénienne comprenait des habitats de tailles diverses et des exploitations agricoles.

Depuis le XIX^{e} siècle, les mycénologues ont pris leurs distances avec l'enthousiasme de Schliemann et des pionniers de la mycénologie pour qui un grand royaume mycénien avait existé. Cette hypothèse, qui résulte d'une lecture littérale du texte d'Homère, n'a pourtant rien de ridicule. Qui, sinon un grand monarque, a pu régner sur un territoire de la taille de l'aire culturelle mycénienne ? Qui, sinon, aurait été à même de rassembler la force de travail considérable et de payer les spécialistes dont on avait besoin pour réaliser les ponts, canaux, barrages et autres infrastructures communes que l'on connaît aux Mycéniens ?

Le remarquable art mycénien traduit également un haut niveau de développement. Et l'emploi d'une écriture, le linéaire B, est tout aussi significatif. Déchiffré en 1952 par l'architecte Michael Ventris et le philologue John Chadwick, le linéaire B est un système syllabique qui utilise environ 200 signes *(voir la photo page précédente)*.

Par ailleurs, la culture mycénienne semble aussi avoir eu la capacité de s'étendre, puisqu'elle en est venue à englober la Crète et les Cyclades. Des fouilles ont aussi montré la présence d'établissements mycéniens à Rhodes, sur l'île de Kos et en Asie mineure. Le récit homérique, du reste, évoque la présence mycénienne dans cette région. Et les archives pharaoniques et hittites prouvent que les grands États de l'époque entretenaient des relations diplomatiques avec les Mycéniens. Des infrastructures communes, autant d'innovations culturelles, une tendance à l'expansion et ces relations diplomatiques sont-elles pensables en l'absence de pouvoir centralisé ?

Oui, estiment certains chercheurs, pour qui ces traits de la culture mycénienne peuvent aussi s'expliquer par l'existence d'une oligarchie, c'est-à-dire de groupes d'aristocrates dirigeant la société. D'autres spécialistes penchent plutôt pour un rôle dominant de la cité de Mycènes, mais dans le contexte d'une galaxie de principautés indépendantes.

Le *megaron*, centre de la citadelle

La monumentalité des palais et des tombeaux mycéniens suggère en effet l'existence de familles régnantes. Les palais étaient des installations multifonctionnelles, comprenant des entrepôts, des ateliers, des archives administratives et des bâtiments de culte.

L'une de leurs structures internes est particulièrement significative. Elle consiste en une salle de réception qu'Homère désigne sous le vocable de *megaron* (mégaron en français). Ces salles étaient toujours aménagées au centre de la citadelle : elles comportent une entrée à deux colonnes suivie d'une antichambre donnant dans une salle du trône au milieu de laquelle brûlait un feu rituel entre quatre colonnes. Un trône en pierre était adossé à l'un des murs, orné de représentations de divinités.

Dans le *megaron* du palais de Pylos, une fresque représente des convives masculins divertis par un chanteur à la lyre. Or les archéologues ont aussi découvert dans le palais des milliers de récipients servant à boire. Dans l'antichambre du *megaron*, la représentation d'une procession accompagnant un taureau surdimensionné montre que les banquets mycéniens étaient des rites en plus d'être des événements sociaux.

Dans la salle du trône, une peinture partiellement conservée représente le sacrifice d'un taureau sur un autel. Un personnage humain surdimensionné mène la procession. S'agit-il d'un érudit, d'un prêtre ou du roi ? Personne ne le sait, car rien de comparable n'a été découvert ailleurs au sein de l'espace mycénien. Contrairement aux peuples des cultures contemporaines du Proche-Orient ou d'Égypte, les Mycéniens n'ont laissé aucune statue de roi, ni de bas-reliefs ou de peintures murales qui auraient pu nous renseigner sur leurs souverains et leurs actions.

Il existe bien quelques représentations de personnages assis sur des trônes, mais ils sont divins. Nous sont aussi parvenues des images de personnages debout devant de telles déesses et tenant des bâtons dans la main. Il pourrait s'agir de sceptres, puisque l'on a retrouvé de tels symboles de commandement à l'intérieur de tombes



DANS LA SALLE DU TRÔNE
du palais de Cnossos, en Crète, un souverain mycénien recevait ses visiteurs. Équipée d'une banquette de gypse courant le long du mur, la salle comportait aussi un trône en bois. Découverte à l'origine dans un couloir proche, la vasque de porphyre placée au centre avait peut-être un rôle cultuel. Les murs sont décorés d'une fresque comportant des griffons sans ailes. Des symboles de l'autorité d'origine divine du souverain ?

mycéniennes anciennes. Homère parle aussi du sceptre reçu de Zeus par les ancêtres d'Agamemnon, dont le roi de Mycènes tirait son autorité ; un sceptre que Pausanias, au début de notre ère, prétendit avoir vu à Chéronée, où on le révérait...

Mais pourquoi douter de la monarchie comme forme de gouvernement chez les Mycéniens ? À cause de la découverte de salles du trône secondaires à Mycènes, à Pylos et à Tirynthe. Servaient-elles au roi lui-même à d'autres occasions que celles qui requéraient le mégaron principal ? Étaient-elles utilisées par une reine, par un remplaçant du souverain ou par quelque haut fonctionnaire ?

Les relations qu'entretenaient les palais les uns avec les autres troublent aussi les mycénologues. Ce sont particulièrement les palais de Mycènes, de Tirynthe et de Midéa, dans l'Argolide (nord-ouest du Péloponnèse), qui intriguent. En effet, même si ces structures palatiales disposaient de mégarons et d'archives, elles sont trop proches les unes des autres pour avoir pu être les capitales d'États autonomes. C'est pourquoi de nombreux chercheurs supposent que Midéa et Tirynthe étaient assujetties à Mycènes, et que le palais de Tirynthe , cité qui se trouvait sur la côte à l'âge du Bronze, n'était rien d'autre qu'une annexe portuaire.

Les textes administratifs sont d'importantes sources d'information sur la vie palatiale. Il s'agit en général de textes composés de mots-clés se rapportant à une année comptable. On y reconnaît des états de stock, des listes de livraisons, des attributions de personnes, d'animaux et de biens, des encours ou des états de déficits…, ce qui donne un aperçu des secteurs de l'économie palatiale et des affaires cultuelles et religieuses. Les mentions de titres, de fonctions, de responsabilités ou encore de propriétaires que contiennent les textes administratifs nous renseignent aussi sur certains aspects des structures administratives et politiques. Or un titre à la signification énigmatique se retrouve souvent dans ces textes : celui de *wanax*. Étant donné son importance manifeste, Pierre Carlier, historien français de l'Antiquité mort en 2011, lui a consacré des recherches approfondies.

Des liens linguistiques

Sur le plan linguistique, *wanax* doit être relié à *anax*, qui signifie « maître ». De fait, dans la Grèce classique et archaïque, c'est en règle générale par ce terme que l'on s'adressait aux divinités. Toutefois, Homère l'emploie aussi en tant que titre royal, qualifiant Agamemnon d'*anax andron*, c'est-à-dire de « maître des hommes ».

En Grèce, le terme *anax* s'est perdu très vite et on ne le retrouve plus guère qu'intégré dans les noms de personnes, comme dans Hipponax ou Anaximenes, tandis que *wanax* est resté un titre au sein de deux cultures marginales du monde antique.

En effet, dans une inscription retrouvée dans une tombe du VI^{e} siècle avant notre ère, un roi phrygien est qualifié de *vanaktei*, que l'on traduit par « maître ». Les philologues s'accordent à penser que le terme est relié à *wanax*, que ce soit par

© Anton Chugarev/shtterstock.com

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

l'intermédiaire d'une racine commune ou parce que le mot phrygien a été dérivé du mot mycénien. L'inscription en question contient aussi le terme *lavagtaei*, lequel est probablement relié au mycénien *lavagetas*, ce qui, d'après les inscriptions en linéaire B, désignerait le plus haut fonctionnaire mycénien après le *wanax* ; il semble que le terme puisse être traduit par celui de « chef de l'armée ».

Un deuxième parallèle linguistique nous amène sur l'île de Crète, où les fils et les frères du roi furent qualifiés d'*anaktes* (pluriel d'*anax*), tandis que ses sœurs et femmes étaient qualifiées d'*anassaï*. Ce terme se rapporte sans doute au terme *wanassa* qui semble qualifier la reine mycénienne dans certains textes.

Une inscription du VI^e^ siècle avant notre ère trouvée dans la ville de Géronthrai livre une troisième attestation de la survivance de ce titre de l'âge du Bronze tardif. On y qualifie les années sans prêtre officiellement en charge comme *awanax*, c'est-à-dire « sans wanax ».

Le terme *wanax* se lit par ailleurs sur beaucoup de tablettes d'argiles et de vases des palais de Chaniá (La Canée), Cnossos, Pylos, Thèbes et Tirynthe. Ailleurs, on ne le trouve pas, mais on n'y a pas non plus retrouvé beaucoup de textes… Le nom du détenteur du poste n'est mentionné dans aucun des textes dont nous disposons, ce qui implique que l'on savait bien qui il désignait : il n'y avait donc qu'un seul *wanax* par cité.

D'après nos sources, les *wanax*, les *lawagetas*, tout comme le fonctionnaire désigné par le terme de *telestai*, disposaient d'un *temenos*, c'est-à-dire d'un domaine personnel ; le *temenos* du roi supposé était trois fois plus grand que celui de tous les autres et des parties importantes de l'économie palatiale lui étaient directement assujetties ; d'autres l'étaient seulement aux *lawagetas*.

La même hiérarchie est révélée par les offrandes faites lors d'une fête en l'honneur du dieu Poséidon : le *wanax* n'était pas le seul à devoir apporter sa part d'offrandes, mais devait assurer la plus grande part. Il apparaît dans ce contexte moins comme un despote que comme le représentant insigne d'une élite, une sorte de « premier entre les pairs », ce qui nous amène à imaginer plutôt une oligarchie dominant l'espace mycénien, plutôt qu'une monarchie. De fait, d'après une tablette d'argile inscrite en linéaire B inhabituellement riche, le *wanax* était le seul à pouvoir nommer les fonctionnaires que l'on désignait par le terme de *damokoros*.

Ces derniers faisaient partie d'une couche intermédiaire de dirigeants, dont la tâche consistait notamment à assurer la communication entre les *basileis* (les représentants des différentes municipalités), les *koreteres* (les personnes placées à la tête des districts mycéniens) et le *wanax*. Le fait que le terme *basileus* soit plus tard devenu la dénomination grecque habituelle d'un roi est à relier à cet organigramme, puisque après la disparition des palais mycéniens et de leurs administrations vers 1200 avant notre ère, ce potentat local a été promu à la tête de la société.

À partir des textes, il est difficile de déterminer si le *wanax* était aussi commandant en chef, législateur et juge suprême, ce qui était le cas dans les cultures voisines contemporaines. Que le terme *lawagetas* puisse se traduire par « chef du peuple (guerrier) » suggère que c'est à ces officiels que revenait la direction dans le domaine militaire.

Par ailleurs, l'analyse de fragments de linéaire B effectuée par le préhistorien Thomas Palaima, de l'université du Texas, l'a amené à souligner la fonction sacrale du *wanax*. Le détenteur de ce titre était-il le plus haut prêtre du culte d'État ? Les représentations de griffons ornant les salles du trône de Pylos et de Cnossos vont dans ce sens, car elles symbolisent une autorité supérieure protectrice. Une rigole située à côté du trône est interprétée comme une installation servant aux offrandes liquides. Tout cela suggère que le *wanax* jouait le rôle d'intermédiaire avec les dieux ou les ancêtres, ce qui le rapprocherait du pharaon égyptien, même si l'idée qu'il aurait été lui-même l'objet d'un culte passe pour improbable. Cependant, plusieurs inscriptions le mentionnent comme le récepteur d'offrandes d'huile en même temps que des divinités, ce qui va plutôt dans le sens d'un culte du roi, de sa famille ou de ses ancêtres.

D'un point de vue linguistique, il est même possible que le terme *wanax* ne se

Le *wanax* n'était pas le seul à apporter sa part d'offrande, mais devait assurer la plus grande part

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

rapporte pas toujours à un souverain, mais parfois à un dieu. C'est là-dessus que repose l'interprétation radicale présentée il y a quelques années par l'historien allemand de l'Antiquité Tassilo Schmitt, qui doute de l'existence d'un royaume mycénien et voudrait voir des noms de divinités dans les dénominations mycéniennes. Ces dernières sont pourtant très fréquentes dans les textes administratifs qui n'ont rien de religieux…

Pour leur part, Brigitta Eder, de l'Académie autrichienne des sciences, et Jorrit Kelder, de l'université d'Amsterdam, ont relancé la thèse que l'on croyait abandonnée de l'existence d'un grand roi régnant sur tout l'espace mycénien. Cette thèse est selon eux impliquée par l'unité étonnante de la culture mycénienne, qui n'aurait pu se former sans une certaine normalisation sous l'influence d'une autorité centrale, point qui caractérise les grandes cultures du Proche-Orient ou d'Égypte.

Que l'on se livrait à des échanges intenses est attesté par les découvertes de produits mycéniens dans ces pays et d'importations égyptiennes ou proche-orientales dans l'espace mycénien. Les historiens de l'art relèvent dans l'art mycénien des éléments provenant de l'Asie occidentale. Les images découvertes en Égypte et en Asie continentale constituent aussi une source intéressante. Ainsi, les peintures des tombes thébaines de la XVIIIe dynastie montrent des Minoens et des Mycéniens offrant des présents, donc des personnes venues en ambassade.

L'Égypte ancienne et l'empire hittite nous ont d'ailleurs légué des correspondances où la Grèce est évoquée plusieurs fois. D'après les annales de Thoutmosis III (1479-1425 avant notre ère), des envoyés seraient arrivés depuis la terre de Tanaja, afin d'apporter les présents habituels, parmi lesquels un plat d'argent de style crétois, et d'établir des relations.

Or on peut déduire qu'il s'agit là de la Grèce continentale et donc des États mycéniens, ce que mentionne clairement un texte de l'époque du pharaon Aménophis IV (1392-1355 avant notre ère) : dans son temple des morts situé dans l'actuelle Kom-el-Hetan (Thèbes ouest), une colonne statuaire mentionne les pays Kaftu et Tanaja et plusieurs de leurs lieux. Beaucoup de ces noms ont été identifiés entre-temps, parmi lesquels Cnossos et Phaistos à Kaftu (Crète) ainsi que Mycènes et d'autres lieux à Tanaja, terme qui correspondrait à la partie continentale du territoire mycénien. Mais il est difficile de dire si les Égyptiens désignaient par ces mots deux entités étatiques.

Dans à peu près 25 tablettes d'argile du XIVe et du XIIIe siècles avant notre ère découvertes à Hattusa, la capitale hittite, il est question d'un empire nommé Ahhiyawa. La ressemblance phonique avec les Achéens d'Homère a alerté les chercheurs. Le grand roi hittite traitait le roi des Ahhiyawas comme son égal puisqu'il l'appelait « mon frère », formule diplomatique qu'il utilisait aussi dans ses échanges avec le pharaon d'Égypte.

Les textes hittites mentionnent aussi la ville de Millawanda, que l'on identifie aujourd'hui à Milet, une ville d'Asie mineure dont les archéologues ont prouvé qu'il s'agissait à l'époque d'une colonie mycénienne. Les tablettes d'argile ne nous disent pas toutefois où se trouvait Ahhiyawa, sauf qu'il fallait traverser une mer pour y parvenir. Le fait que cet endroit se trouve dans l'espace égéen est aujourd'hui certain. Selon certains chercheurs, Ahhiyawa pourrait désigner Mycènes, selon d'autres il s'agirait de Thèbes, la capitale de la Béotie.

Quoi qu'il en soit, les lettres hittites – une correspondance entre deux grands souverains – renforcent l'impression qu'une grande monarchie mycénienne a existé à l'époque palatiale, sauf à penser que les Hittites étaient mal renseignés sur la situation politique en Grèce continentale.

Le *wanax*, roi suprême ou roi parmi d'autres ?

D'un autre côté, les documents rédigés en linéaire B infirment plutôt l'idée de l'existence d'un grand roi mycénien : il n'existe en effet qu'un unique texte traitant de questions dépassant la sphère d'influence d'un palais. L'impression créée par le corpus des textes en linéaire B est donc plutôt qu'il aurait existé plusieurs États mycéniens indépendants les uns des autres, mais en étroit contact ; il semble bien qu'un personnage nommé *wanax* se trouvait à la tête de ces États. Dans ses attributions et tâches, il ressemblait à beaucoup d'égards aux autres rois de l'âge du Bronze. Cette constatation est la seule que nous pouvons faire avec certitude : il semble bien, que dans l'espace mycénien, le chef s'appelait *wanax*, et qu'il était sans doute roi. Un roi suprême, comme l'Agamemnon d'Homère ? ■

BIBLIOGRAPHIE

J.-C. Poursat, **La Grèce préclassique – Des origines à la fin du VIe siècle**, Seuil, 1995.

P. Carlier, **La Royauté en Grèce avant Alexandre**, AECR, Strasbourg, 1984.

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017



ENDNOTE X8
UN NOUVEAU MODÈLE DE COLLABORATION

Partagez vos bibliothèques avec **100 collaborateurs,**
Interface et **workflow collaboratif** dernier cri.

Windows 10 Compatible

Mac

Nouvelle version EndNote X8 :
ritme.com/endnote
Tél. : 01 42 46 00 42

Distributeur officiel en France, Italie et Suisse

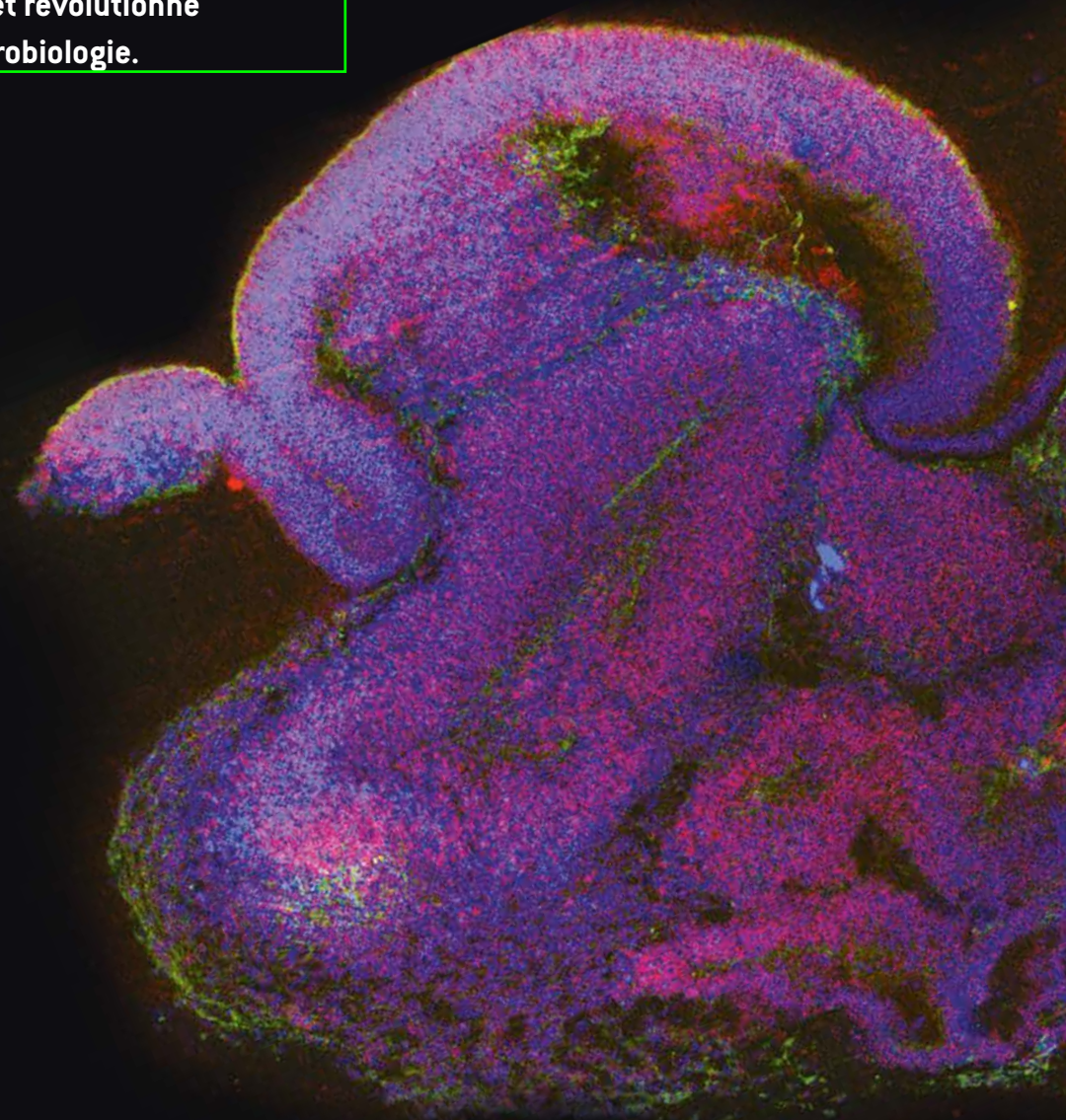
RITME SCIENTIFIC SOLUTIONS

EndNote est une marque déposée de Thomson Reuters. Toutes les marques déposées sont la propriété de leurs sociétés respectives. © 2016 RITME

Des **minicerveaux** fabriqués **in vitro**

Jürgen Knoblich

Faire croître en laboratoire de petits cerveaux pour étudier les mécanismes de certains troubles mentaux et tester des médicaments ? Ce projet devient réalité et révolutionne l'expérimentation en neurobiologie.



L'ESSENTIEL

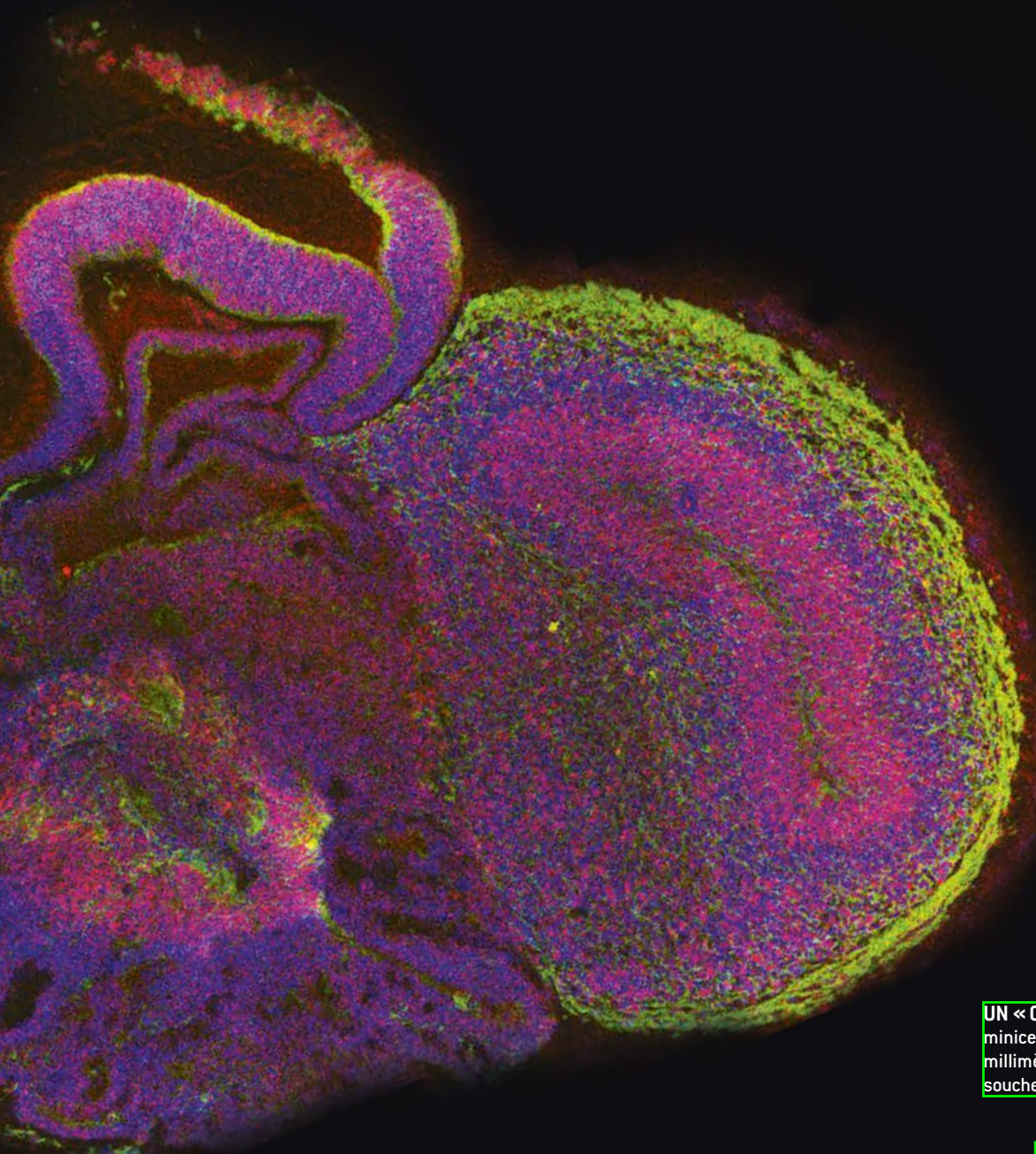
- Les chercheurs savent aujourd'hui faire pousser de petits cerveaux à partir de cellules souches humaines mises en culture.
- Ces minicerveaux humains permettent de tester l'effet de médicaments, ou la validité d'hypothèses sur des maladies neurologiques.
- Ils sont probablement plus fiables que les modèles animaux pour étudier des pathologies typiquement humaines.

© Lancaster, M. A. et al. Cerebral organoids model human brain development and microcephaly. Nature 501, 373–379 (2013). fig 1a. Avec l'aimable autorisation de Jürgen Knoblich, IMBA, Vienne.

L'essentiel de ce qui fait de nous des humains se trouve concentré dans 1,4 kilogramme de tissu jaunâtre à base d'eau, de lipides et de sels minéraux : notre cerveau. Dans ce volume restreint se développent nos pensées, prennent naissance l'amour et la haine, émergent les idées les plus créatives – et aussi les moins reluisantes – du genre humain. Cette structure évocatrice d'un cerneau de noix est également l'organe le plus complexe que la nature ait engendré. Le cerveau héberge environ 86 milliards de neurones ou cellules nerveuses, qui doivent voir le jour au bon moment, atteindre leur emplacement approprié et se connecter de la bonne façon à leurs voisins.

Comprendre exactement comment se développe et fonctionne le cerveau humain est l'un des plus grands défis de la biologie moderne. La plupart des connaissances que nous avons acquises sur cet organe depuis la naissance des neurosciences, il y a plus d'un siècle, sont issues d'expériences menées sur des animaux, souvent des souris ou des rats. Les scientifiques ont longtemps justifié cette approche par le fait que ces rongeurs et les humains ont une architecture cérébrale commune : les types de cellules nerveuses sont souvent identiques, et généralement les mêmes parties du cerveau sont mobilisées pour effectuer des processus mentaux communs aux trois espèces. Humains et rongeurs diffèrent toutefois sur un point essentiel : alors que le cerveau de la souris est lisse, celui de l'homme est plissé.

Aux yeux d'un non-scientifique, cette différence peut sembler anodine. Mais pour les neurobiologistes, les rides à la surface du cerveau sont un aspect crucial, qui détermine en grande partie le fonctionnement de cet organe dans notre espèce. En effet, la structure chiffonnée du cortex permet de faire tenir un nombre colossal de neurones dans un volume limité. Et de fait, elle est un trait remarquable de tous les animaux « intelligents », tels que singes, chats, chiens et baleines. Les biologistes de l'évolution ont découvert



UN « ORGANOIDE CÉRÉBRAL », minicerveau humain de quelques millimètres, créé à partir de cellules souches dans un milieu artificiel.

L'AUTEUR



Jürgen KNOBLICH est directeur scientifique adjoint de l'Institut de biotechnologie moléculaire de l'Académie autrichienne des sciences, à Vienne.

que le plissement résulte d'une autre différence entre les souris et les humains : dans de nombreuses régions du cerveau, les neurones sont issus d'un ensemble particulier de précurseurs cellulaires, qui sont abondants dans notre espèce mais très rares chez la souris.

C'est aussi pourquoi de nombreuses mutations génétiques à l'origine de graves troubles neurologiques chez l'homme n'ont que peu d'effet lorsqu'elles sont transférées à des souris. Si une mutation altère le développement ou le fonctionnement d'une architecture neuronale propre au cerveau humain, ou le fonctionnement de types cellulaires présents uniquement chez les humains, étudier cette mutation chez des souris ne revêt qu'un intérêt limité. En fait, les caractéristiques uniques du cerveau humain sont peut-être l'une des raisons pour lesquelles les études réalisées sur des rongeurs n'ont pas débouché sur des thérapies efficaces pour des troubles tels que la schizophrénie, l'épilepsie ou l'autisme.

Prenant acte des différences entre le cerveau de la souris et celui de l'être humain, certains chercheurs ont poursuivi de nouvelles pistes. Ainsi, dans mon laboratoire, nous visons à cultiver, dans une boîte de Pétri, la majeure partie d'un cerveau humain à un stade précoce de son développement embryonnaire. Les structures cérébrales obtenues, qualifiées d'organoïdes, sont des sortes de minicerveaux *in vitro*. Elles sont porteuses d'espoirs immenses car elles fournissent aux neurobiologistes des informations auxquelles on n'a pas accès en étudiant les rongeurs. Il devient possible d'observer, par exemple, ce qui se passe dans un minicerveau infecté par le virus Zika, dont on sait qu'il perturbe le développement cérébral chez les fœtus de femmes infectées. Autre possibilité : suivre l'évolution d'un minicerveau créé par génie génétique de façon à ressembler à un cerveau humain atteint d'une maladie neurologique…

Nous avons commencé à travailler sur ces minicerveaux en 2012, lorsque Madeline Lancaster, à l'époque postdoctorante dans notre groupe, a conçu un moyen de reproduire dans une boîte de Pétri les processus essentiels à la formation du cerveau chez le fœtus humain, approximativement au cours des dix premières semaines du développement *(voir l'encadré page 44)*.

Fabrication à partir de cellules souches

Notre méthode repose sur des cellules souches qui présentent une caractéristique remarquable, la pluripotence. Autrement dit, elles sont de même type que celles présentes chez le très jeune embryon, et lorsqu'on les cultive dans de bonnes conditions, elles peuvent donner naissance à n'importe quel type de tissu : nerveux, musculaire, sanguin, osseux… Chez le fœtus, ces nouvelles cellules ne conservent leur pluripotence que pendant quelques jours. Mais en utilisant des cultures spéciales en laboratoire, il est possible de les conserver dans cet état en permanence et les transformer finalement en presque n'importe quel type cellulaire souhaité.

Comment faisons-nous pousser des minicerveaux ? Nous commençons par mettre en culture des cellules dans un liquide contenant tous les nutriments nécessaires à la croissance du neuroectoderme, la partie du fœtus destinée à former le système nerveux. Lorsque les cellules s'agrègent pour former une boule nommée corps embryoïde, nous immergeons cette boule dans du Matrigel. Ce gel, produit par des cellules en culture provenant d'une tumeur du cartilage de souris, ressemble à la membrane sur laquelle reposent les cellules chez le fœtus. Le Matrigel est riche en facteurs qui à la fois stimulent la division des cellules et les empêchent de mourir. De ce fait, il fournit une charpente assez rigide pour que les cellules puissent s'y agripper, mais suffisamment malléable pour qu'elles la modifient et la déforment à leur guise.

Les résultats de ces expériences ont été impressionnants. Livrés à eux-mêmes

LE VIRUS ZIKA PROVOQUE des microcéphalies en bloquant la croissance des neurones du cerveau. L'étude de ce processus sur des cerveaux de synthèse pourrait déboucher sur de futurs traitements.



© ANTONIO LACERDA/EPA/CORBIS

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

dans le gel, les corps embryoïdes se développent en trois dimensions et forment des boules blanches de tissu ressemblant au cerveau humain embryonnaire. Exposées aux signaux chimiques appropriés qui déclenchent le développement du cerveau fœtal, les cellules souches engendrent des répliques exactes du prosencéphale, la région appelée à devenir le siège de fonctions mentales supérieures telles que la planification, le raisonnement ou la mise au point de stratégies. Cette partie du cerveau comprend des structures telles que le cortex (la surface externe et plissée) et le plexus choroïde (la région qui produit le liquide céphalorachidien).

Nous avons également observé la formation d'autres structures qui guident les cellules vers le bon emplacement dans le cerveau en développement. Les éminences ganglionnaires médianes et latérales, qui remplissent cette fonction, y contribuent en donnant naissance à des cellules qui inhibent en général l'activité neuronale (des interneurones) et à l'hippocampe, essentiel pour la formation de la mémoire.

Les cellules d'un organoïde en développement s'organisent de la même façon que celles d'un cerveau d'un fœtus humain de 8 à 10 semaines. Dans de rares cas, les organoïdes développent même de petits œilletons, des indentations dans le tissu contenant des pigments colorés, comme ce qui se passe quand l'œil humain commence à se former. De même, comme dans un cerveau en développement, les cellules se divisent et donnent naissance aux divers types de neurones présents chez un fœtus. Ceux-ci projettent également des axones, de longs filaments qui établissent le contact avec des cellules voisines pour former un réseau de signalisation actif. Précisons qu'avant la formation de ces réseaux, les neurones migrent d'une région vers une autre, comme ils le font chez le fœtus : dès lors, les minicerveaux en développement sont potentiellement intéressants pour comprendre ce qui se passe dans les maladies psychiatriques dues à un défaut de migration des neurones.

Les organoïdes cérébraux suscitent de grands espoirs, car ils fournissent des informations impossibles à obtenir avec des souris

L'idée de produire des tissus en culture a une histoire. Le développement actuel des organoïdes résulte en réalité de nombreuses années de recherches par tâtonnements, dont certaines remontent à plus d'un siècle. Déjà en 1907, le zoologiste Henry Wilson avait démontré que certains animaux simples, tels que les éponges, ont la capacité de se réassembler après avoir été dissociés en cellules individuelles – signe que chacune de leurs cellules est dotée d'un programme qui permet de reconstituer l'ensemble de l'édifice à partir de ses composants épars. Une observation qui porte en germe l'idée selon laquelle quelques cellules souches disposeraient des informations nécessaires pour reconstruire un cerveau entier.

Et dès 1939, le biologiste germano-américain Johannes Holtfreter découvrit en effet que les différentes cellules d'un embryon de grenouille, même après avoir été totalement séparées, tendent à se rencontrer et à reconstituer la forme initiale. Au cours des années 1980, cette découverte a conduit à une prolifération d'études de « réagrégation », où se formaient en laboratoire des organes animaux complexes, tels la rétine ou même le cortex, par assemblage de leurs différents types cellulaires.

Tirant avantage des premières expériences de réagrégation effectuées entre 2006 et 2010, le chercheur japonais Yoshiki Sasai (qui s'est suicidé en 2014 sur fond de scandale à la fraude scientifique touchant l'une de ses collègues) fut l'un des premiers à utiliser des cellules souches pluripotentes pour la culture de tissus du système nerveux, en particulier de rétine humaine. En fait, notre technique d'organoïdes cérébraux a rejoint les siennes grâce aux travaux pionniers du généticien néerlandais Hans Clevers, de l'université d'Utrecht, qui a mélangé des cellules souches avec du Matrigel pour établir un système utilisable pour cultiver des tissus d'intestin, d'estomac et même de foie et de pancréas.

Au-delà des leçons tirées de ces premières études, nos travaux s'appuient sur des techniques récentes qui bouleversent de vastes pans de la recherche biomédicale. L'une d'elles, dite de reprogrammation, a été mise au point par le lauréat du prix Nobel Shinya Yamanaka, de l'université de Kyoto. Elle consiste à transformer des cellules du corps déjà pleinement matures (qu'il s'agisse de cellules de peau ou de sang) en cellules souches pluripotentes grâce à une simple série de manipulations génétiques. On peut ensuite transformer ces cellules pluripotentes en différents types de cellules cérébrales, puis les mettre en culture pour obtenir des organoïdes. Une approche qui a l'avantage d'éviter le recours à des cellules issues d'embryons.

Les bénéfices de la reprogrammation sont immenses : vous pouvez comparer un organoïde cultivé à partir de cellules d'un patient atteint d'une anomalie génétique avec ceux d'une personne en bonne santé, afin d'identifier les causes sous-jacentes d'une maladie, car le défaut génétique présent dans les cellules du patient devrait avoir les mêmes conséquences sur l'organoïde que chez le fœtus en développement.

Percer les secrets de la microcéphalie

En fait, nous avons déjà utilisé la technique des organoïdes pour étudier la microcéphalie, une forte réduction de la taille du cerveau à la naissance. Nous avons trouvé que les organoïdes cultivés à partir de cellules d'un patient atteint de microcéphalie sont beaucoup plus petits que la normale. Comme il est possible de cultiver un nombre illimité de cellules du patient, nous pouvons désormais procéder à des analyses détaillées de la chaîne d'événements moléculaires qui conduit à la microcéphalie chez le fœtus en développement.

Cela vaut probablement aussi en grande partie pour d'autres troubles cérébraux : l'utilisation d'organoïdes cultivés à partir de cellules des patients devrait permettre aux neurobiologistes de mieux comprendre les défauts affectant le développement du cerveau qui sont à l'origine de la schizophrénie, de l'épilepsie et d'autres maladies difficiles, voire impossibles, à étudier chez l'animal.

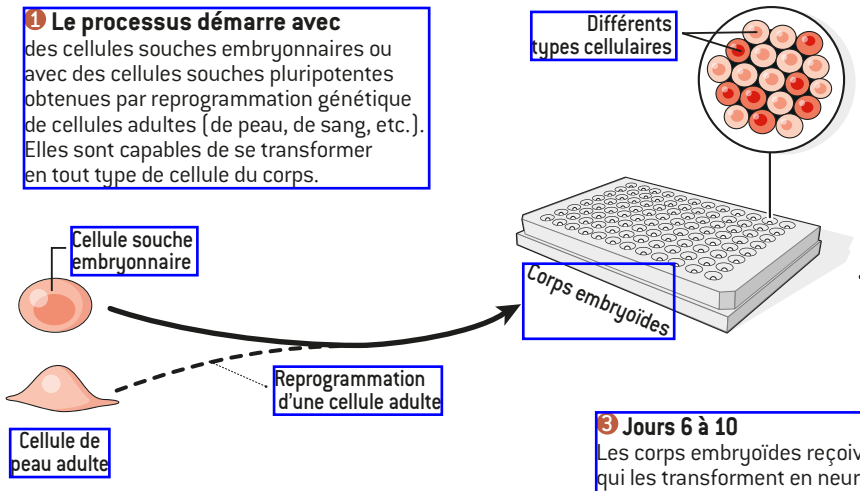
Une autre approche consiste à fabriquer des organoïdes à partir de cellules de personnes saines. De tels minicerveaux ont déjà été fructueusement utilisés durant l'actuelle épidémie d'infection par le virus Zika, soupçonné d'être à l'origine d'une microcéphalie chez plusieurs bébés nés de femmes infectées lors de leur grossesse.

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

COMMENT CRÉER UN CERVEAU EN LABORATOIRE ?

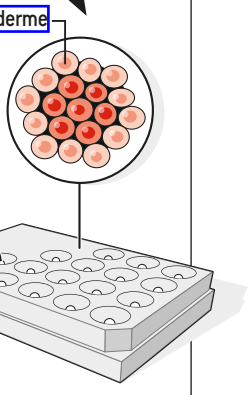
Pour créer un organoïde cérébral, ou minicerveau, les chercheurs déposent une minuscule boule de cellules souches sur un lit baigné de nutriments, où elle peut se développer. Les cellules reproduisent ensuite en grande partie le processus de développement qui se déroule chez le jeune embryon.

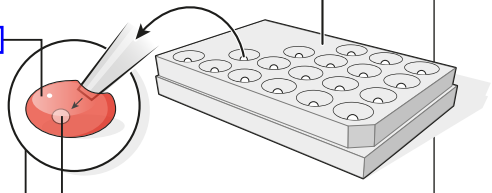
1 Le processus démarre avec
des cellules souches embryonnaires ou avec des cellules souches pluripotentes obtenues par reprogrammation génétique de cellules adultes (de peau, de sang, etc.). Elles sont capables de se transformer en tout type de cellule du corps.



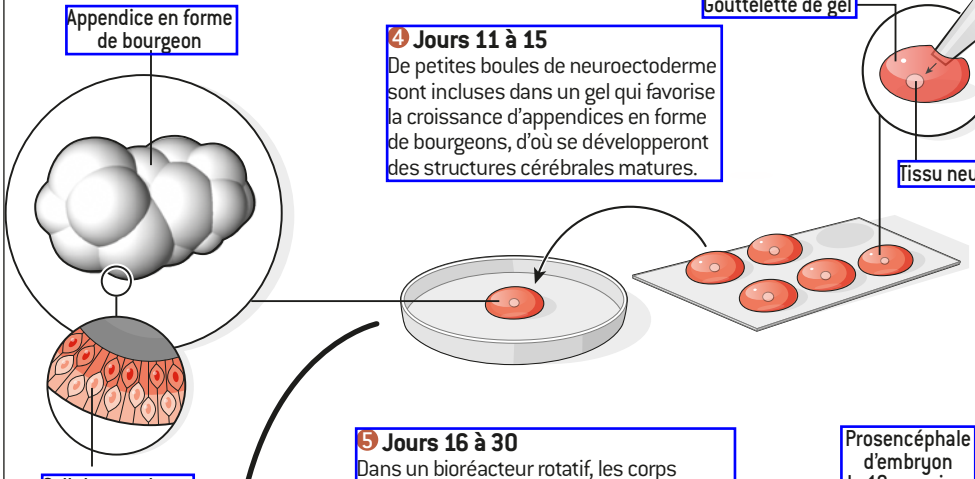
2 Jours 0 à 5
Les cellules se divisent et s'agrègent en boules appelées corps embryoïdes. En l'espace de trois jours, ces cellules commencent à former trois couches distinctes nommées ectoderme, mésoderme et endoderme.

3 Jours 6 à 10
Les corps embryoïdes reçoivent des nutriments qui les transforment en neuroectoderme, la partie du fœtus à l'origine du cerveau humain.





4 Jours 11 à 15
De petites boules de neuroectoderme sont incluses dans un gel qui favorise la croissance d'appendices en forme de bourgeons, d'où se développeront des structures cérébrales matures.



RÉSULTAT : après un mois d'incubation, les cultures présentent l'apparence du prosencéphale d'un embryon âgé de 10 semaines. Cette région du cerveau comprend le cortex (la grande structure plissée externe) et le plexus choroïde (la région qui produit le liquide céphalorachidien).

5 Jours 16 à 30
Dans un bioréacteur rotatif, les corps embryoïdes se développent en organoïdes cérébraux, des boules blanches de tissu cérébral qui ressemblent au prosencéphale d'un fœtus humain en développement.

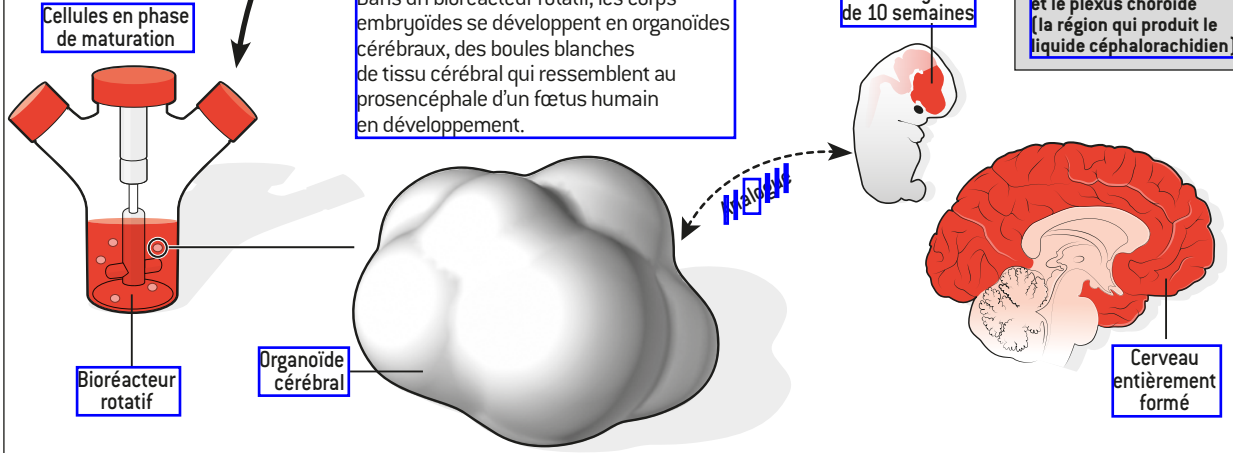


Illustration de Ivan Oransky, d'après M. A. Lancaster et al., Nature Protocols, vol. 9, p. 2329-2340, oct. 2014

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

De nombreuses équipes travaillant sur ce thème, d'abord au Brésil puis aux États-Unis, ont désormais établi que le virus provoque parfois une microcéphalie, lien qui serait resté hypothétique si la technique des minicerveaux n'avait pas existé. Quand des organoïdes sont infectés par le virus Zika, leurs neurones grandissent beaucoup moins que ceux d'organoïdes non infectés. Et une partie de ces neurones meurent. Les organoïdes infectés sont alors bien plus petits que les organoïdes non infectés, et leur taille similaire à celle d'organoïdes obtenus à partir de cellules de notre patient atteint de microcéphalie.

Les organoïdes seront très probablement utiles pour d'autres recherches sur le virus Zika. En cultivant un grand nombre de ces minicerveaux et en infectant chacun d'eux avec une souche virale différente, on pourrait comprendre pourquoi le virus provoque une microcéphalie dans certaines zones géographiques et non dans d'autres. Grâce aux minicerveaux, on pourrait également tenter de savoir pourquoi certaines personnes développent une microcéphalie après une exposition au virus Zika, et non d'autres. Les organoïdes serviront aussi, espère-t-on, à identifier le site d'arrimage – le « récepteur » – utilisé par le virus pour accéder à l'intérieur des cellules et ils seront peut-être d'une importance capitale pour tester de potentiels médicaments contre le virus Zika, avant de les utiliser dans des études cliniques menées sur des patients.

D'autres applications sont envisageables : en introduisant dans les cellules des organoïdes des mutations suspectées de causer une maladie, on pourra vérifier directement si les défauts génétiques entraînent effectivement l'apparition de certains signes cellulaires de la maladie. À terme, les chercheurs pourront évaluer si, en réparant ces mutations, on obtiendrait des organoïdes sains – auquel cas ces travaux pourraient aboutir à de nouveaux traitements.

Les neurobiologistes sont impatients d'explorer encore d'autres applications de la technique des minicerveaux, par exemple la mise au point de médicaments. En testant l'action d'une nouvelle molécule sur le tissu cérébral, il ne sera plus nécessaire de pratiquer des tests sur des animaux, ce qui réduira les coûts de développement de médicaments.

Autre avantage : en identifiant des effets indésirables sur le développement du cerveau humain, on contribuera à ce que des composés thérapeutiques potentiellement nocifs pendant la grossesse ne soient jamais délivrés à une femme enceinte. Si l'on avait testé de cette façon le thalidomide, médicament qui perturbe le développement du cerveau au début de la grossesse et provoque des malformations congénitales, ce composé n'aurait probablement pas été prescrit comme antinauséeux à la fin des années 1950 et pendant les années 1960, ni provoqué des séquelles lourdes sur des milliers de fœtus. Et probablement en aurait-il été de même de la dépakine, l'antiépileptique au cœur de l'actualité qui, pris au cours de la grossesse, entraînerait des malformations et retards mentaux chez le nouveau-né.

Un minicerveau de 4 millimètres

C'est l'équivalent d'un cerveau de fœtus âgé de 9 semaines. La durée de vie de ces organoïdes cérébraux peut atteindre 10 à 15 mois et des chercheurs ont réussi à y reproduire en accéléré des symptômes de la maladie d'Alzheimer.



Shinya Yamanaka

Ce biologiste japonais a reçu le prix Nobel en 2012 pour ses travaux sur les cellules souches. Il a réussi à transformer des cellules matures du corps (peau ou sang) en cellules souches pluripotentes, c'est-à-dire aptes à donner naissance à divers types cellulaires différenciés, dont les neurones. Ces principes servent aujourd'hui à créer des minicerveaux en laboratoire.

Des minicerveaux mi-homme, mi-singe…

Signalons enfin que les organoïdes sont en passe de devenir un précieux outil pour les biologistes de l'évolution. Grâce à eux, on pourrait identifier les gènes responsables de la taille du cerveau humain, très supérieure à celle du cerveau d'autres primates. La comparaison du génome humain avec celui des simiens a d'ores et déjà permis d'identifier des gènes susceptibles d'être impliqués dans des fonctions cognitives telles que le langage. Le fonctionnement de ces gènes reste en grande partie incompris, mais aujourd'hui les scientifiques arrivent à introduire des gènes de singe dans des organoïdes humains pour déterminer leur impact sur le développement du cerveau. Ou inversement : insérer des gènes, voire des régions entières d'un génome humain, dans un organoïde de singe pour le faire fonctionner d'une façon plus semblable à un minicerveau humain…

L'idée de cultiver un cerveau humain dans une boîte de Pétri peut en inquiéter certains, et cela se comprend. Comment ne pas songer au film *Matrix*, où des cerveaux cultivés en laboratoire développent des pensées, voire des personnalités ? Il faut revenir à la science pour faire la part du réel et du fantasme. La probabilité qu'un cerveau produit en laboratoire développe un esprit est nulle. Un organoïde n'est pas un « humanoïde » dans un pot et n'en sera pas un dans un futur proche. En effet, tout être conscient doit être capable de traiter des informations provenant

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

de ses sens pour être à même de forger un modèle mental, interne, de la réalité. Les minicerveaux ne sont capables ni de voir ni d'entendre, et sont dépourvus de toute entrée sensorielle. Même si nous parvenions à les connecter à un appareil photographique et à un microphone, il faudrait que les informations visuelles et auditives entrantes soient traduites en une forme que ces cellules cérébrales en boîte de Pétri puissent comprendre – et, en l'état actuel des connaissances, la réalisation de cette traduction représente un défi technique insurmontable.

Autrement dit, ces craintes, quoique légitimes, sont scientifiquement infondées. Les organoïdes ne sont pas des cerveaux fonctionnels, ce sont seulement des morceaux de tissu vivant qui imitent le fonctionnement moléculaire et cellulaire du cerveau à des niveaux de détail impressionnants. Ils ressemblent à des pièces de tissu retirées lors d'un acte de chirurgie du cerveau, et non à des êtres conscients.

Pour autant, la culture d'organoïdes pose indéniablement certains problèmes éthiques et juridiques. Tous les minicerveaux sont issus de cellules prélevées chez des personnes qui ont certains droits. En tant que tels, ces travaux réalisés en laboratoire doivent être conformes aux mêmes règles légales et éthiques applicables par exemple aux échantillons prélevés chez des patients dans tout pays industriel. Les patients doivent naturellement donner leur autorisation avant que leurs cellules puissent être utilisées en laboratoire. Les mêmes règles s'appliquent aux organoïdes. Cependant, même lorsque les bénéfices sont clairement expliqués, au début les donneurs peuvent ne pas être à l'aise avec l'idée que leurs cellules sont mises en culture pour former des structures de type cérébral.

Compte tenu de ces différents arguments, il semble tout de même que les bénéfices de cette technologie cellulaire priment sur tout éventuel inconvénient. Les organoïdes cérébraux ont conduit à des expériences médicales et toxicologiques réalistes et performantes menées sur du tissu humain, sans avoir besoin de recourir à l'expérimentation animale. D'autres chercheurs et moi-même souhaitons néanmoins les améliorer.

Par exemple, la génération actuelle de minicerveaux est dépourvue de vaisseaux sanguins. Cela ne pose pas de problème durant les premiers stades du développement de ces organes, mais au bout d'un certain temps les cellules commencent à mourir par manque d'oxygène et de nutriments. En théorie, il devrait être possible de produire des vaisseaux sanguins, que ce soit à l'aide de nouvelles techniques d'impression 3D, ou en les cultivant à partir de cellules souches. Les chercheurs savent que les vaisseaux sanguins se développent vers l'intérieur du cerveau, un processus qu'il devrait être possible de reproduire en culture tridimensionnelle.

À quand des cerveaux grandeur nature ?

Un autre défi consiste à créer des organoïdes qui, comme le cerveau réel, présentent des axes de symétrie antéropostérieure, supéro-inférieure et latérale. Autrement dit, deux hémisphères en miroir l'un de l'autre, et un aspect différencié entre l'avant et l'arrière, et entre le dessus et le dessous.

Pour l'instant, contrairement à ce que l'on observe chez un embryon réel, les organoïdes sont dépourvus d'axes de symétrie antéropostérieure et supéro-inférieure. De ce fait, ils se développent de façon aléatoire, de sorte que leurs diverses parties individuelles présentent différentes orientations. Dans le cerveau en développement, des systèmes complexes de signalisation impriment au cerveau son sens du haut et du bas, et ces mêmes composés chimiques peuvent finalement en faire autant pour les organoïdes. Des méthodes biotechnologiques modernes permettent d'obtenir des cultures de tissus qui contiennent les composés chimiques nécessaires pour stimuler la croissance cellulaire pendant le développement. Ces techniques pourraient conduire à la formation d'organoïdes présentant un cerveau antérieur à l'une des extrémités et un cerveau postérieur à l'extrémité opposée.

Nous recherchons actuellement les moyens de repousser ces frontières. D'ores et déjà, la capacité de produire certaines parties d'un cerveau et de travailler sur un échantillon vivant a ouvert un chapitre nouveau de la recherche biologique : nous disposons désormais de systèmes *in vitro* beaucoup plus réalistes qu'auparavant, et parfois même d'une alternative raisonnable à l'utilisation d'animaux. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Kelava et M. A. Lancaster, **Dishing out mini-brains : Current progress and future prospects in brain organoid research,** *Developmental Biology*, vol. 420(2), pp. 199-209, 2016.

M. A. Lancaster et J. A. Knoblich, **Organogenesis in a dish : Modeling development and disease using organoid technologies,** *Science*, vol. 345, p. 283, 2014.

M. A. Lancaster et J. A. Knoblich, **Generation of cerebral organoids from human pluripotent stem cells,** *Nature Protocols*, vol. 9, pp. 2329-2340, 2014.

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

Dans quelle société souhaitons-nous vivre ?

Les algorithmes sont probablement le premier outil à la mesure de nos aspirations.

Cessons de les subir, en cherchant à les comprendre.

Serge Abiteboul et Gilles Dowek





192 P. | 17 €

Retrouvez toutes nos nouveautés sur notre site
www.editions-lepommier.fr

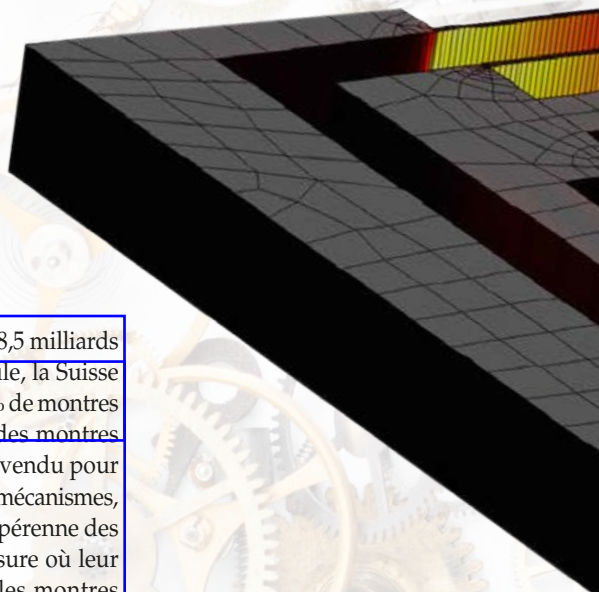
Éditions Le Pommier

Gilles Dowek : ©Sébastien Dolidon ; Serge Abiteboul : ©INRIA

Une **horlogerie** mécanique **sans tic-tac**

Simon Henein et Ilan Vardi

Le mécanisme à échappement des montres mécaniques, utilisé depuis la Renaissance, devient-il obsolète ? Un nouveau principe d'oscillateur promet des mouvements horlogers plus efficaces. Et plus silencieux…



L'ESSENTIEL

- Les montres mécaniques sont moins précises que les montres à quartz, mais restent très appréciées.
- Leur concept de base – celui du mouvement à échappement – n'a pas varié depuis la Renaissance.
- Les mouvements isochrones imaginés par Newton ont inspiré un nouveau principe de mouvement horloger.
- En Suisse, une équipe a construit un prototype prometteur d'horloge sans échappement, donc sans tic-tac.

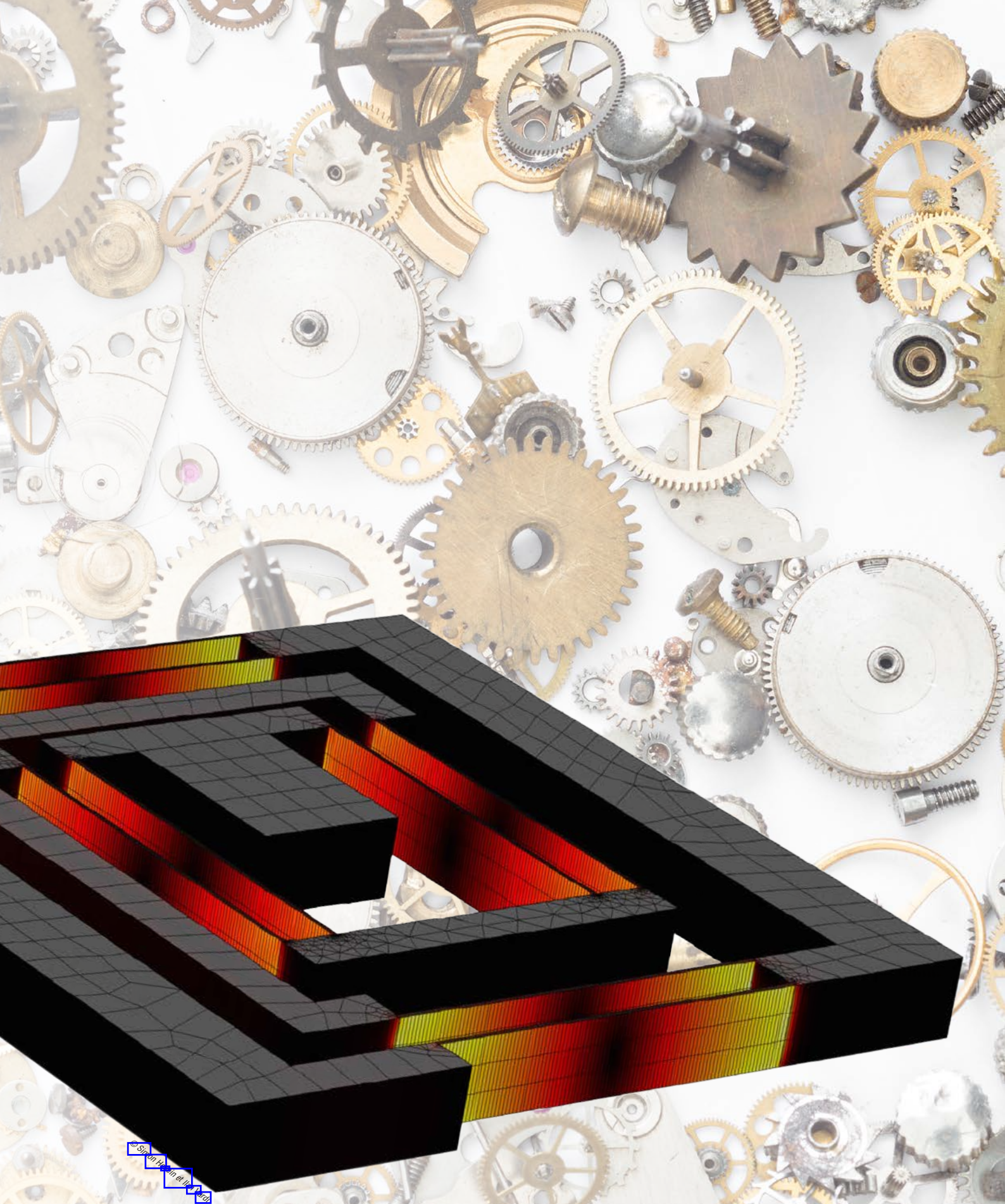
En 2015, les horlogers ont vendu pour quelque 38,5 milliards d'euros de montres dans le monde. À elle seule, la Suisse en a vendu pour 19 milliards d'euros, dont 80 % de montres mécaniques – lesquelles ne représentent que 2 % des montres vendues dans le monde… De son côté, la France a vendu pour 1,3 milliard d'euros de montres mécaniques, dont les mécanismes, le plus souvent, sont… suisses. C'est dire le succès pérenne des montres de luxe. Un succès paradoxal dans la mesure où leur utilité comme garde-temps est compromise par les montres à quartz, plus précises et moins onéreuses, ainsi que par les omniprésents téléphones portables. Dès lors, une idée reçue est que les mécanismes horlogers auraient cessé d'évoluer et qu'il n'y aurait plus rien à découvrir ni à inventer dans ce domaine. Notre vision, celle du laboratoire de conception micromécanique et horlogère de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, à Neuchâtel, est tout autre : nous avons entrepris de transformer fondamentalement la montre mécanique, dont le principe est resté inchangé depuis… deux siècles !

Nous travaillons ainsi sur plusieurs nouveaux principes de mécanismes horlogers. Notre projet phare est *IsoSpring*, une

L'ISOSPRING est un oscillateur composé de deux chariots emboîtés et attachés à des lames flexibles. Son principe, qui assure un mouvement cyclique continu et unidirectionnel, pourrait remplacer celui du balancier-spiral des montres mécaniques actuelles.

© Shutterstock.com / Ilgens

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017



© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

LES AUTEURS



Simon HENEIN et Ilan VARDI sont respectivement professeur de microtechnique et mathématicien au sein du laboratoire Instant-Lab de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, en Suisse.

nouvelle base de temps qui élimine le dispositif à l'origine du fameux tic-tac des montres mécaniques actuelles : l'échappement. Cet organe a pourtant été la grande avancée qui a permis le développement de l'horlogerie mécanique au Moyen Âge. L'objectif d'*IsoSpring* est d'aboutir à une montre mécanique au mouvement intrinsèquement continu, plus précis, plus autonome et d'une réalisation plus simple.

La mesure du temps a son origine dans les cycles naturels : les 24 heures d'une journée correspondent au mouvement apparent du Soleil autour de la Terre ; les quelque 30 jours du mois au cycle lunaire ; les 365 jours de l'année au cycle des saisons. Dès l'Antiquité, on a cherché à s'affranchir de ces phénomènes. Plusieurs principes de garde-temps ont été inventés, tels le sablier ou encore l'horloge à eau. Celle que construisit le savant chinois Su Song au XI^{e} siècle avait des performances chronométriques impressionnantes et comportait d'ailleurs déjà une forme d'échappement.

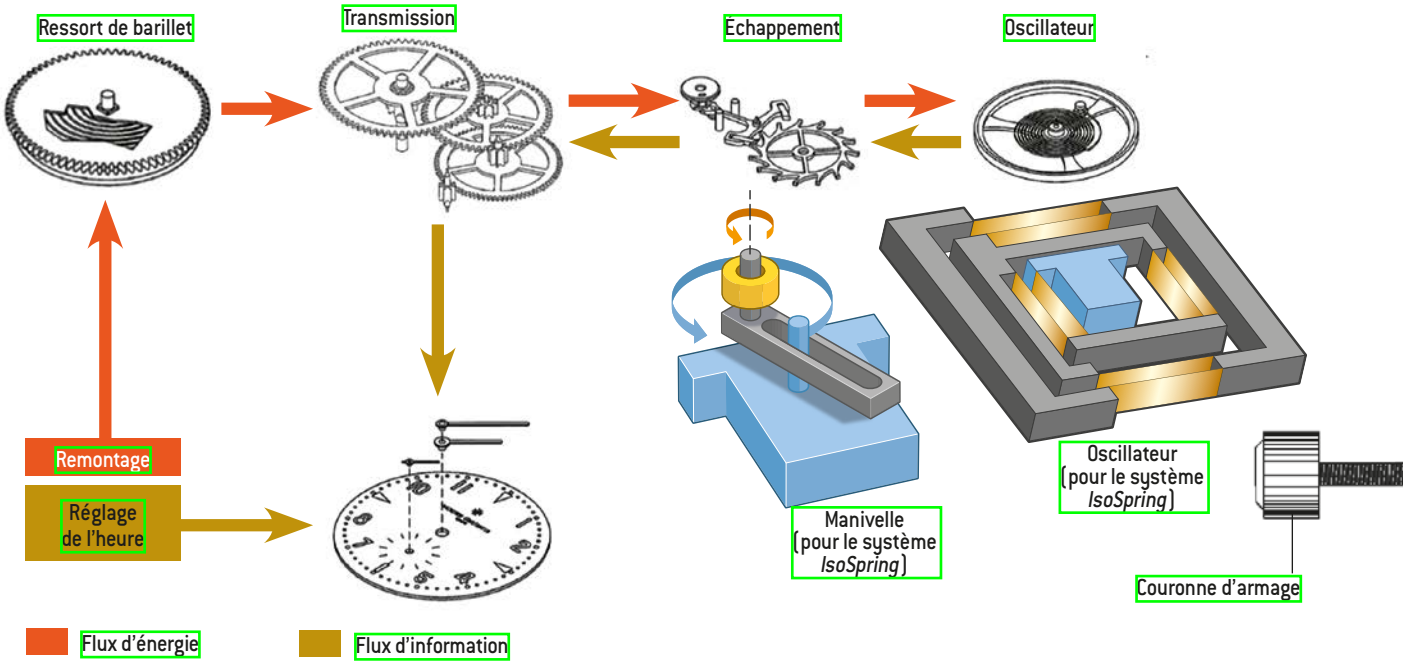
En Europe, c'est au Moyen Âge qu'a été inventé l'échappement, un mécanisme qui discrétise le temps, en d'autres termes qui le hache. Dans les montres-bracelets, sa forme commune d'aujourd'hui est l'échappement à ancre, du nom d'une pièce à deux bras terminés par des doigts – nommés palettes. Du fait du mouvement de va-et-vient du balancier-spiral – l'oscillateur qui donne la base de temps à la montre – les palettes libèrent puis arrêtent régulièrement une roue dentée, la roue d'échappement *(voir l'encadré page 52)*.

L'échappement, cause du tic-tac

Ainsi, l'échappement arrête le mouvement puis le relâche par à-coups. Les artisans ont affiné son fonctionnement au fil des siècles jusqu'à parvenir à des mouvements dotés d'une précision chronométrique de quelques minutes par jour. Pour autant, l'efficacité de l'échappement est limitée

LE FONCTIONNEMENT DE LA MONTRE MÉCANIQUE

Dans les horloges et montres mécaniques, l'énergie, fournie par un ressort armé ou une masse suspendue, est transmise à un échappement dont la cadence est contrôlée par un régulateur. Jusqu'au XVII^{e} siècle, le régulateur était un foliot, un balancier qui, par le biais du train d'engrenage, est accéléré de manière alternée par la force du ressort ou du poids. L'inconvénient de ces horloges anciennes était que leur précision dépendait directement de l'intensité de la force motrice. Huygens a remplacé le foliot par un oscillateur beaucoup plus précis : le pendule. Dans une montre mécanique, l'oscillateur est un balancier-spiral. Toutes les horloges et montres mécaniques dépendent de l'échappement qui entretient les oscillations du régulateur et permet de les compter pour afficher l'heure. Dans le nouveau mécanisme développé par l'équipe des auteurs, l'échappement et le balancier-spiral sont remplacés par une manivelle et un oscillateur à deux chariots *(en couleur)*.



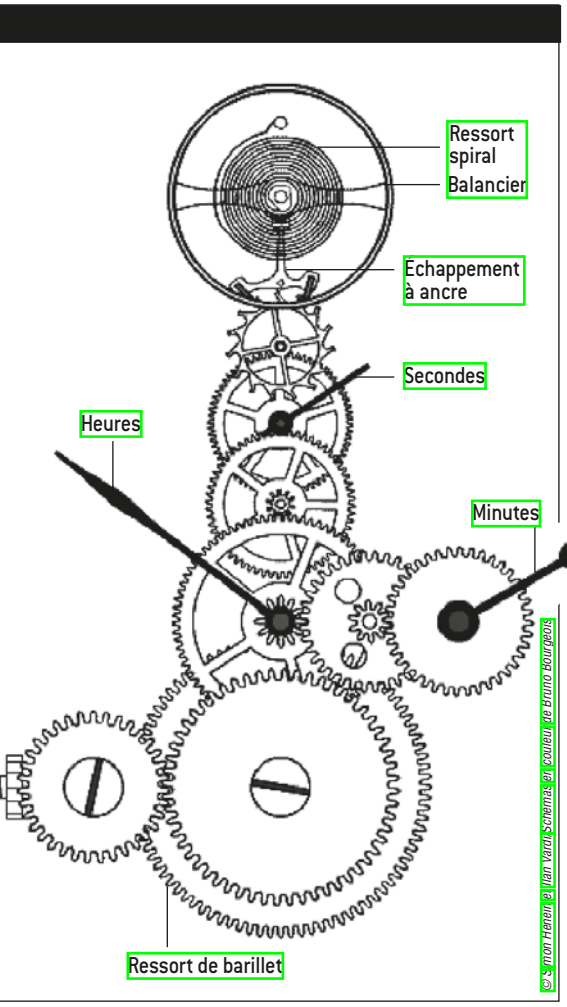
© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

par les frottements des palettes et par son fonctionnement intermittent.

Une grandeur nommée facteur de qualité permet d'apprécier à quel point le frottement limite le mouvement d'un oscillateur horloger. Ce facteur est défini comme le nombre d'oscillations qu'effectue un oscillateur libre (découplé du ressort qui le meut normalement) avant que son amplitude angulaire ne représente plus que 4,3 % de l'amplitude d'origine. L'oscillateur horloger d'une montre-bracelet est son balancier-spiral, dont le facteur de qualité est de seulement 200. À titre de comparaison, le facteur de qualité d'une banale montre à quartz valant moins de 10 euros dépasse les 100 000 et celui de l'horloge de clocher la plus précise du monde, le Big Ben de Londres, est de 9 300…

En outre, après la création de premières montres mécaniques à la Renaissance, une très longue évolution a été nécessaire avant d'atteindre le niveau de performance des montres-bracelets actuelles. Retraçons-la brièvement, afin de bien saisir le principe à l'origine d'*IsoSpring*. La plus grande révolution horlogère est l'introduction par le physicien néerlandais Christiaan Huygens, en 1656, de l'oscillateur comme base de temps. Huygens a mis en application le concept d'isochronisme découvert par Galilée en 1609, à savoir que la période d'un pendule dépend très peu de l'amplitude de ses oscillations quand celles-ci sont petites.

Huygens avait aussi découvert le principe de l'oscillateur harmonique, un cas d'oscillateur idéal pour lequel la force de rappel est proportionnelle au déplacement, ce qui, dans le cas du pendule gravitaire, n'est approximativement vrai que pour les petites oscillations. Or l'Anglais Robert Hooke a montré, de son côté, que des forces de rappel proportionnelles au déplacement apparaissent lors des déformations élastiques de la matière. Cette observation s'applique en particulier aux lames élastiques, ce qui a conduit au ressort spiral d'horlogerie (inventé par Huygens et par Hooke), qui ramène le balancier vers sa position d'équilibre à la fin de chaque période.



Du temps solaire au temps mécanique

La mise à profit des oscillateurs en horlogerie a fait passer la précision chronométrique de 15 minutes par jour (soit une précision d'environ 1 %) pour le mouvement sans ressort régulateur employé auparavant, à 10 secondes par jour (précision d'environ 0,01 %) pour les oscillateurs. En d'autres termes, on a amélioré la précision d'un facteur 100. Les horloges sont ainsi devenues plus précises que le suivi du Soleil, qui produit des jours dont la durée varie de plus ou moins 30 secondes selon les périodes de l'année.

Sans une théorie scientifique du temps – à savoir l'équation de l'oscillateur et sa solution mathématique –, il est clair que cette avancée majeure de l'horlogerie n'aurait pas été possible. Et en introduisant un temps civil, désormais découplé des cycles naturels, l'horlogerie a acquis un rôle capital dans la société.

Le va-et-vient des oscillateurs du XVII^{e} siècle nécessitait des échappements performants et fiables. Les échappements à détente et à ancre ont été inventés et perfectionnés au XVIII^{e} siècle par les horlogers

Le commerce des montres

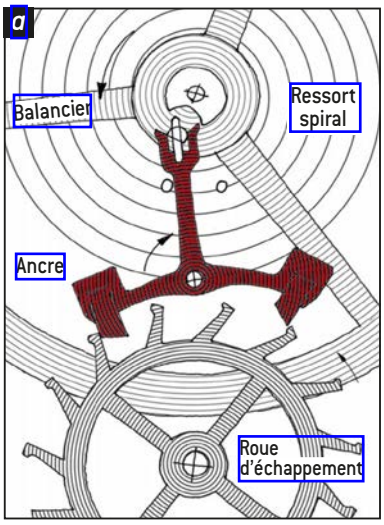
La montre mécanique, considérée par beaucoup comme désuète depuis l'avènement des montres électroniques, se porte pourtant bien sur le plan commercial. Si la Suisse ne produit qu'environ 2 % des montres en nombre de pièces, elle encaisse plus de la moitié des revenus mondiaux grâce aux montres mécaniques haut de gamme, dont le prix est des milliers de fois supérieur à celui d'une montre à quartz.

Cette dernière, inventée à Neuchâtel en 1967, est plus précise que la montre mécanique, mais elle ne séduit pas les amateurs de produits de luxe. Ceux-ci cherchent un objet plus artisanal, avec lequel ils pourront créer un lien émotionnel.

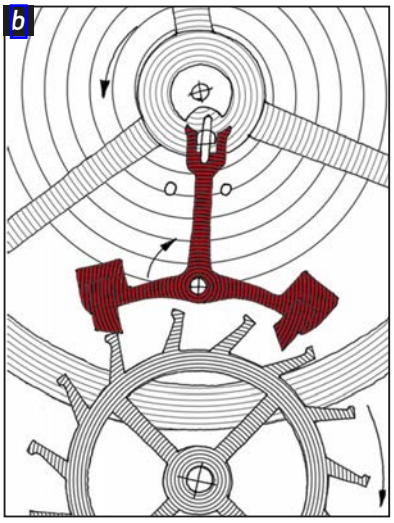
© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

L'ÉCHAPPEMENT À ANCRE

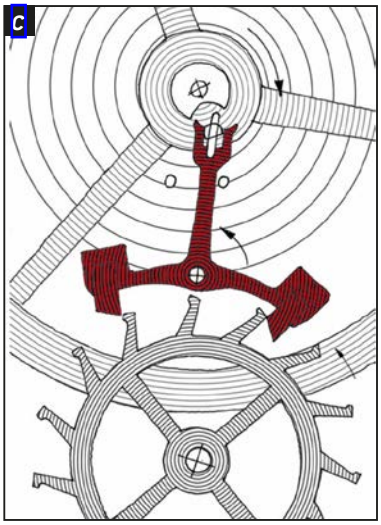
L'échappement à ancre est utilisé dans la majorité des montres mécaniques. Il a été imaginé en 1769 par l'horloger britannique Thomas Mudge. Il fonctionne en arrêtant complètement le train d'engrenage de la montre. Les rouages de la montre sont ainsi immobilisés 90 % du temps ! Toutefois, huit fois par seconde, le balancier libère le mouvement, qui reçoit une impulsion, puis l'arrête à nouveau. Le mouvement s'effectue donc par chocs successifs qui produisent le son caractéristique du tic-tac des montres et horloges mécaniques. Les entrées en contact répétées de l'ancre avec les dents de la roue d'échappement induisent des frottements, d'où l'imperfection intrinsèque du principe de l'échappement. En raison des pertes d'énergie associées, le rendement mécanique des échappements d'aujourd'hui ne dépasse pas 35 %.



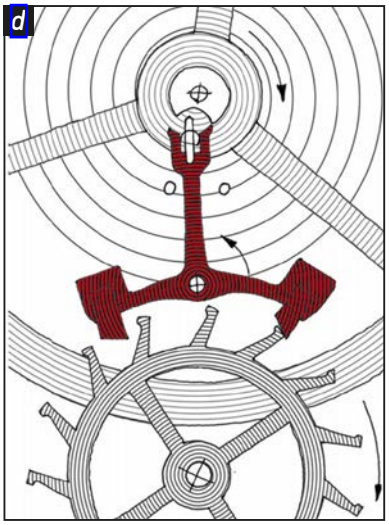
L'ANCRE bloque la roue d'échappement que, sinon, le ressort moteur (non visible sur l'image) propulserait dans le sens horaire.



LA ROTATION DU BALANCIER-SPIRAL dans le sens antihoraire déverrouille l'ancre, qui bascule et libère ainsi la roue d'échappement. Celle-ci, mue par le ressort moteur, tourne alors dans le sens horaire.



L'ANCRE vient à nouveau bloquer la roue d'échappement après que celle-ci a parcouru dans le sens horaire un angle égal à un demi-pas interdentaire.



LE BALANCIER-SPIRAL revient de son oscillation, cette fois dans le sens horaire, et libère la roue d'échappement, qui avance à nouveau d'un angle égal à un demi-pas interdentaire.

© Jean-Noël Verly

anglais John Arnold, Thomas Earnshaw et Thomas Mudge, ainsi que par les horlogers français et suisses tels que Pierre Le Roy, Ferdinand Berthoud et Abraham-Louis Breguet. Les avancées ont été telles que leur concept de montre mécanique est toujours employé aujourd'hui, même si sa mise au point culmina en 1800 ! Pour autant, de nombreux progrès de détail ont rendu les montres mécaniques actuelles plus précises et plus fiables.

Une limitation majeure subsiste toutefois : l'échappement, notamment celui à ancre, le plus utilisé, reste un organe mécanique complexe dont le rendement énergétique ne dépasse pas 35 % environ. C'est nettement en deçà des performances des transmissions mécaniques usuelles. D'où notre approche, qui consiste à remettre en cause l'échappement. Comment ?

Des ellipses isochrones

Nous sommes revenus à 1687, année où Isaac Newton a publié ses *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*. Il y démontre que des lois simples expliquent la mécanique céleste. L'un de ses résultats les plus importants est la démonstration des lois de Kepler du mouvement planétaire, dont la première est que les planètes parcourent des trajectoires elliptiques dont le Soleil est un foyer.

Newton a formulé sa loi de la gravitation universelle et prouvé qu'elle conduit aux lois de Kepler. Par esprit de systématique, il a aussi recherché quelles autres lois d'attraction entre corps célestes produiraient des trajectoires elliptiques. Il a ainsi découvert que c'est le cas d'une attraction proportionnelle à la distance séparant une planète de son soleil (le centre d'attraction), ce qui rejoint la loi de Hooke, d'après laquelle la force de rappel d'un ressort est proportionnelle à l'allongement de celui-ci.

La loi de la gravitation universelle et la loi linéaire de Hooke ont toutefois des implications différentes. Selon la première, le point d'attraction se trouve sur l'un des foyers de l'ellipse, tandis que selon la seconde, il se situe en son centre. La loi de la gravitation universelle implique que la durée de l'année est d'autant plus longue que la planète est éloignée de son soleil (troisième loi de Kepler), alors que selon la loi linéaire, cette durée est indépendante de la distance entre la planète et son soleil.

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

En d'autres termes, le système solaire décrit par la loi d'attraction de Hooke est isochrone : si la loi de la gravitation était du type de celle de Hooke, la durée de l'année serait identique pour toutes les planètes de même masse, quelles que soient leurs orbites.

Cette dernière propriété est le point de départ de notre invention d'une nouvelle base de temps pour remplacer le pendule et les oscillateurs classiques. Les trajectoires isochrones découvertes par Newton sont exactement ce que cherche l'horloger. Ces mouvements sont en outre continus et unidirectionnels, puisque les planètes ne s'arrêtent jamais et ne changent pas de sens, contrairement au pendule et au balancier-spiral qui rebroussent chemin deux fois par cycle.

Afin d'élaborer un mécanisme réalisant les hypothèses requises par les orbites

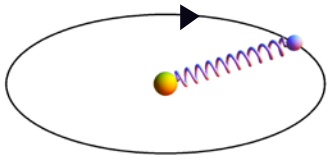
Les mouvements orbitaux décrits par Newton sont isochrones, mais aussi unidirectionnels et continus

isochrones de Newton, nous avons établi le cahier des charges suivant :
1) La « planète », c'est-à-dire le corps de l'oscillateur, subit une force de rappel variant linéairement avec la distance.
2) Cette force est centrale, c'est-à-dire orientée vers un point fixe unique.
3) Cette force est isotrope (intensité indépendante de la direction).
4) Le corps de l'oscillateur se comporte comme une masse ponctuelle située en son centre de masse.
5) Le dispositif devra pouvoir être rendu aussi insensible à la pesanteur que possible.

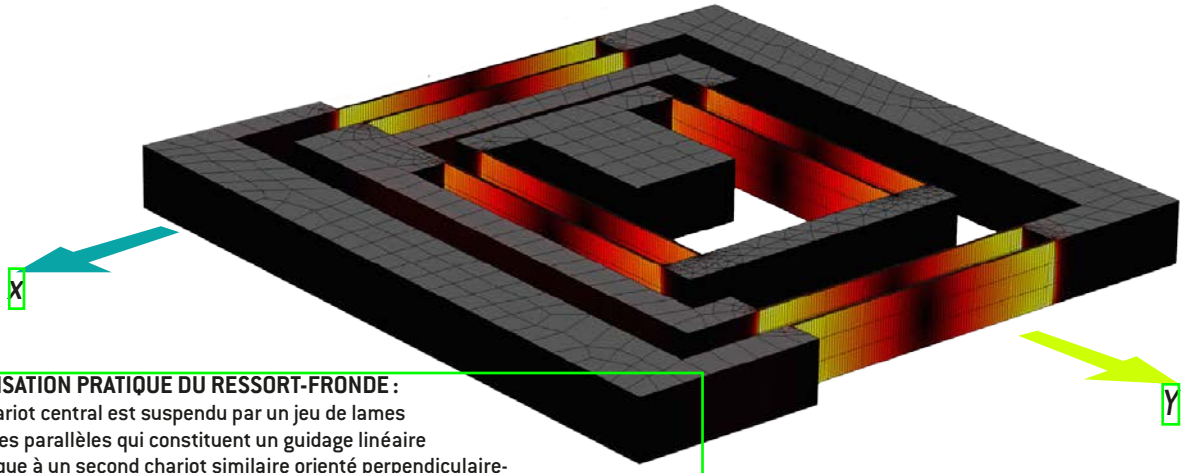
Les points (1) et (2) décrivent un ressort dont la force de rappel est toujours dirigée vers le centre d'attraction (nommé soleil) : c'est un « ressort central ». Nous l'avons réalisé en adoptant la solution d'une table à deux degrés de liberté en translation. Elle est constituée d'un chariot primaire

UN OSCILLATEUR CONÇU POUR ÉCHAPPER À L'ÉCHAPPEMENT

Alors que la réalisation, même précise, d'un échappement – un casse-tête technique pour les ingénieurs – produit un mouvement isochrone saccadé, l'oscillateur *IsoSpring*, de conception moins complexe, produit un mouvement isochrone continu. Ce dernier est en outre bien plus facile à entretenir car il est moins sujet aux frottements. Son principe fait passer des bases de temps classiques, dotées d'un seul degré de liberté (comme une masselotte oscillant linéairement au bout d'un ressort) à des bases de temps à deux degrés de liberté, à la façon d'une masselotte qui glisserait sur le plan au bout d'un ressort dont l'autre extrémité est fixée en un point et qui décrirait ainsi une ellipse centrée sur ce point.



PRINCIPE DU RESSORT-FRONDE :
une masselotte est reliée par un ressort de rappel attaché à un point fixe (centre de force). Une fois lancée, la masselotte décrit une ellipse centrée sur ce point.



RÉALISATION PRATIQUE DU RESSORT-FRONDE :
un chariot central est suspendu par un jeu de lames flexibles parallèles qui constituent un guidage linéaire élastique à un second chariot similaire orienté perpendiculairement. Comme la masselotte du ressort-fronde, le chariot central est libre de se translater dans le plan. Il subit une force de rappel toujours dirigée vers le centre de force et proportionnelle à son écartement. Une fois lancé, le chariot central décrit alors une ellipse avec une période indépendante de la forme de l'ellipse.

© Simon Henein & Ilan Vardi



© Alain Herzog, EPFL/Simon Henein

imbriqué dans un chariot secondaire, les deux soutenus par des systèmes de lames. Un déplacement Δx du chariot primaire dans la direction X se traduit par une force de rappel proportionnelle à Δx et entraîne aussi le chariot secondaire ; de même, le déplacement Δy du chariot secondaire dans la direction Y perpendiculaire à X se traduit par une force de rappel proportionnelle à Δy *(voir l'encadré page précédente)*. Ces lames sont dimensionnées de telle sorte que le chariot secondaire est rappelé avec la même force par unité de longueur (la même constante de ressort) dans la direction X et dans la direction Y, de sorte qu'il parcourt les ellipses attendues.

Le système ainsi construit est linéaire et isotrope : il respecte les conditions du cahier des charges et constitue une matérialisation du système solaire isochrone imaginé par Newton suffisamment fidèle pour constituer une base de temps horlogère. Le concept d'isotropie est à l'origine du nom *IsoSpring* que nous avons donné à cet oscillateur, par contraction des mots anglais *isotropic* (« isotrope ») et *spring* (« ressort »).

Le mouvement des chariots est une pure translation, donc ils ne changent pas d'orientation durant leur déplacement : le système se comporte comme si la « planète » (la masse mobile centrale, c'est-à-dire le chariot primaire) était une masse ponctuelle. Les lames sont en outre naturellement très rigides dans la direction verticale, de sorte qu'elles contraignent le mouvement à rester dans le plan d'oscillation. Ainsi, lorsque le mécanisme est placé horizontalement, la gravité reste toujours perpendiculaire au mouvement et n'affecte donc pas la dynamique du système.

Par ailleurs, le mouvement de l'oscillateur est entretenu par une manivelle télescopique reliée au ressort de barillet, c'est-à-dire au ressort moteur du mécanisme d'horlogerie. Ce dispositif remplace l'échappement en restituant de manière continue à l'oscillateur l'énergie qu'il perd par frottement. La consommation énergétique du mouvement est considérablement réduite pour deux raisons. D'une part, l'utilisation de ressorts à lames, qui évite l'emploi d'axes susceptibles de frotter, augmente le facteur de qualité d'un ordre de grandeur (c'est-à-dire le multiplie par 10). D'autre part, le remplacement de l'échappement par une simple manivelle télescopique *(voir l'encadré page précédente)* se traduit par un rendement de cet étage de transmission de l'ordre de 80 % à 95 %, à comparer aux 35 % des échappements classiques…

Un mécanisme horloger continu et silencieux

En 2015, notre équipe a construit un prototype d'horloge fonctionnelle dotée d'un oscillateur *IsoSpring* à deux chariots oscillants dont la performance chronométrique et le rendement sont prometteurs *(voir la figure à gauche ci-dessus)*. Sur le plan conceptuel, le projet *IsoSpring* se résume à passer des oscillateurs horlogers classiques, tous à un degré de liberté (l'oscillation porte sur une seule variable angulaire), à des oscillateurs à deux degrés de liberté (l'oscillation porte sur deux variables indépendantes). Ceux-ci produisent des trajectoires cycliques, unidirectionnelles et continues, et rendent ainsi l'échappement caduc.

Nous poursuivons le projet en testant diverses architectures. Nous avons par exemple construit un prototype d'horloge dont l'oscillateur est une sphère, dont le mouvement promet d'être moins sensible à la gravité. Tout cela présage un saut quantitatif de la réserve de marche et de la précision chronométrique des horloges, grâce à l'univers isochrone de Newton qui nous a inspiré un microcosme horloger continu et silencieux. ■

LA BASE DE TEMPS ***IsoSpring*** **a été mise à profit pour réaliser le prototype d'un mouvement d'horloge énergétiquement beaucoup plus efficace qu'un mouvement d'horloge à échappement. Il reste à le miniaturiser pour le faire entrer dans le boîtier d'une montre-bracelet.**

BIBLIOGRAPHIE

L. Rubbert *et al.*, **Isotropic springs based on parallel flexure stages**, *Precision Engineering*, vol. 43, pp. 132-145, 2016.

S. Henein *et al.*, **IsoSpring : vers la montre sans échappement**, actes de la Journée d'étude de la SSC (Société suisse de chronométrie), pp. 49-58, 2014.

C.-P. Sesin, **Mesure du temps**, *Dossier Pour la Science* n° 37 (« La science au Moyen Âge »), pp. 114-115, octobre-janvier 2003.

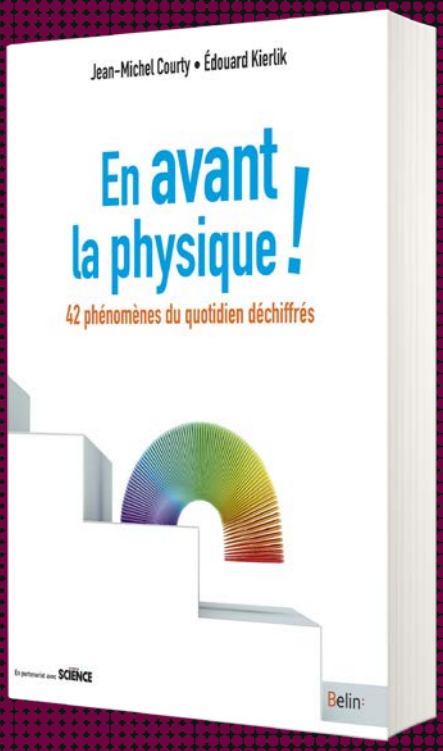
L. Defossez, **Les savants du XVII^e siècle et la mesure du temps**, éditions du Journal Suisse d'Horlogerie et de Bijouterie, 1946.

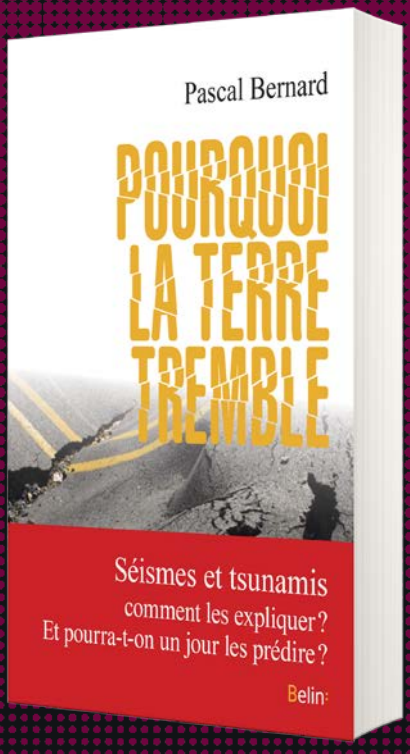
© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

Le nouvel opus de deux vulgarisateurs hors pair !

Une bouteille qui chante. Un verre de chocolat soluble qui tinte. Un carillon dont les cloches homothétiques couvrent toute la gamme. Un escalier qui joue du clairon. Une sculpture qui filtre certains sons... Et en avant la physique !

18,5 x 24,5 cm - 192 pages – 24 euros





Séismes et tsunamis, comment les expliquer ? Et pourra-t-on un jour les prédire ?

Une découverte passionnante de la lente évolution de nos connaissances sur les séismes, qui se lit comme un roman !

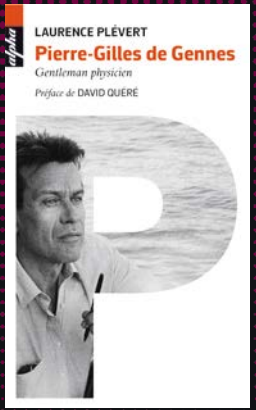
15 x 22 cm – 288 pages – 19,50 €

Et aussi...

Dans notre collection de livres de poche



10 x 17 cm – 304 pages – 9,90 €



10 x 17cm – 392 pages – 9,90 €

Belin ÉDITEUR

Inscrivez-vous à la newsletter sciences sur **www.belin-editeur.com**

Des kilonovæ aux ultranovæ

Daniel Kasen

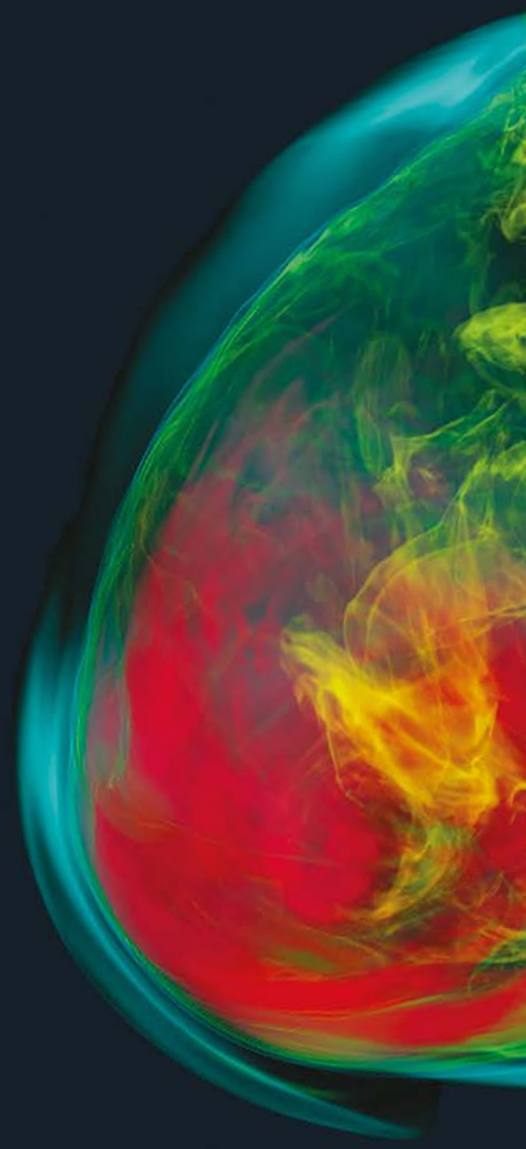
De nombreuses étoiles achèvent leur vie en de formidables explosions : les supernovæ. Or celles-ci se sont révélées d'une intrigante diversité. Quels sont les mécanismes susceptibles d'en rendre compte ?

À peu près chaque seconde, quelque part dans l'Univers observable, une étoile meurt à la suite d'une catastrophe cosmique : collision avec une autre étoile, effondrement de l'astre sur lui-même éventuellement suivi de la formation d'un trou noir ou d'une explosion en supernova. Ainsi, l'Univers est bien plus dynamique que ne le laisse penser le calme apparent du ciel nocturne. Et alors que les chercheurs reconstituent depuis près d'un siècle les grandes lignes de l'évolution cosmique, c'est seulement depuis quelques années que les astronomes ont les moyens d'étudier des événements à l'échelle des étoiles qui se produisent en quelques jours voire quelques heures, ceux-là même qui correspondent à la mort de ces astres.

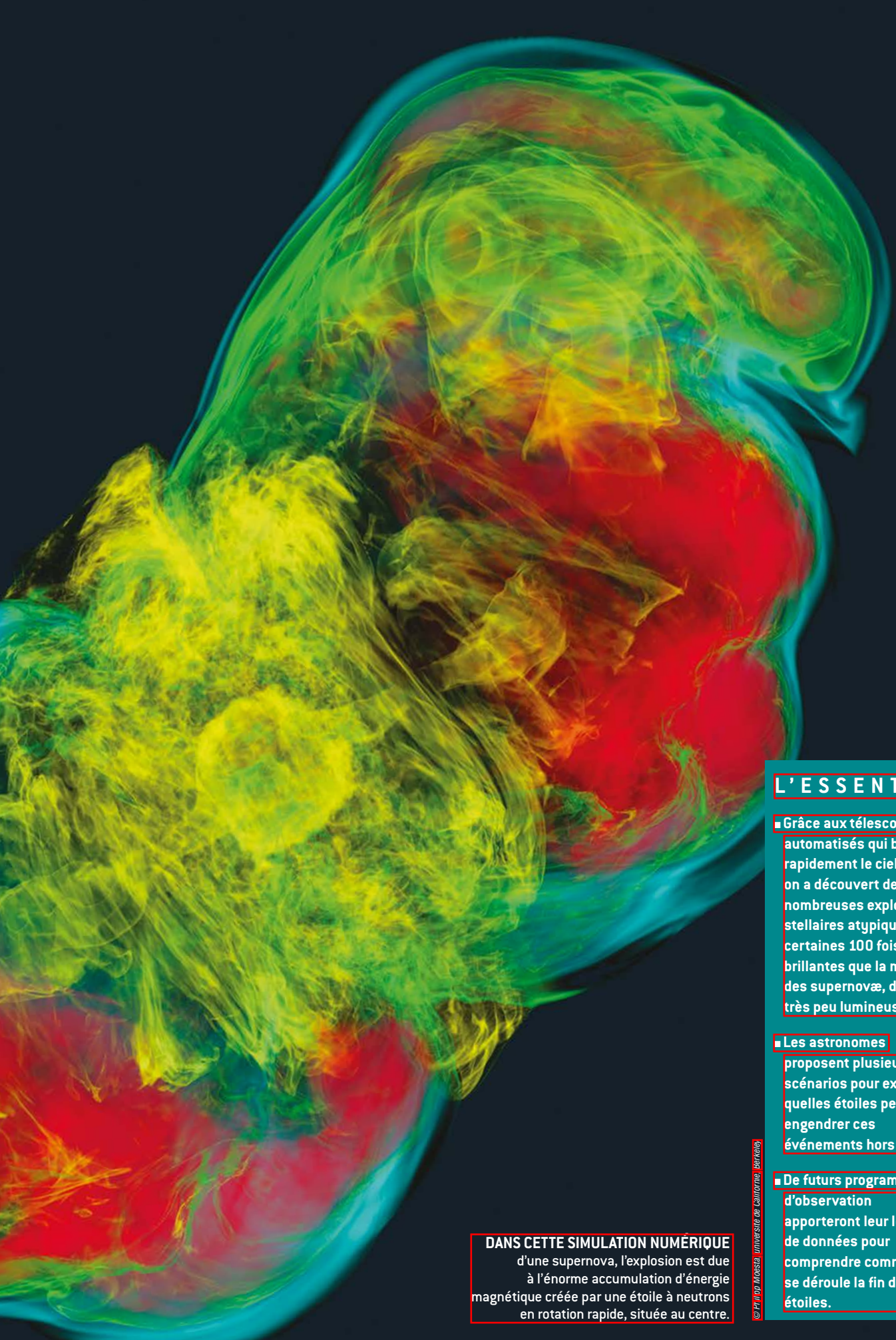
Pourtant, l'homme a été à maintes reprises témoin du caractère fragile de la vie des étoiles. En 1006, par exemple, les Chinois ont observé une « étoile invitée » visible à l'œil nu pendant quelques semaines. Tycho Brahe a consigné un événement similaire en 1572, et Johannes Kepler un autre, trente ans plus tard. Nous savons aujourd'hui que ces apparitions correspondaient à des explosions d'étoiles en supernovæ. À leur pic de luminosité, ces supernovæ brillent plus intensément que un milliard de soleils. Néanmoins, la plupart se produisent très loin de nous et nous apparaissent comme de simples points lumineux qui passent souvent inaperçus dans l'immensité du ciel.

Les techniques modernes ont révolutionné l'étude de l'Univers. Les télescopes sont désormais robotisés et équipés de caméras numériques de haute résolution. Les données qu'ils recueillent sont analysées automatiquement par des logiciels de traitement d'image et de reconnaissance de motifs. Ces systèmes font un suivi régulier de vastes régions du ciel, à l'affût de tout ce qui explose dans la nuit. Depuis une décennie, grâce à ces outils, les astronomes découvrent chaque année des milliers de nouvelles explosions stellaires : chaque semaine, on découvre autant de nouvelles supernovæ que l'on n'en avait vu tout au long du XX^{e} siècle.

Les astronomes observent davantage de supernovæ, mais ils en découvrent aussi des cas atypiques. Certaines explosions stellaires sont anormalement brillantes, une centaine de fois plus lumineuses



© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017



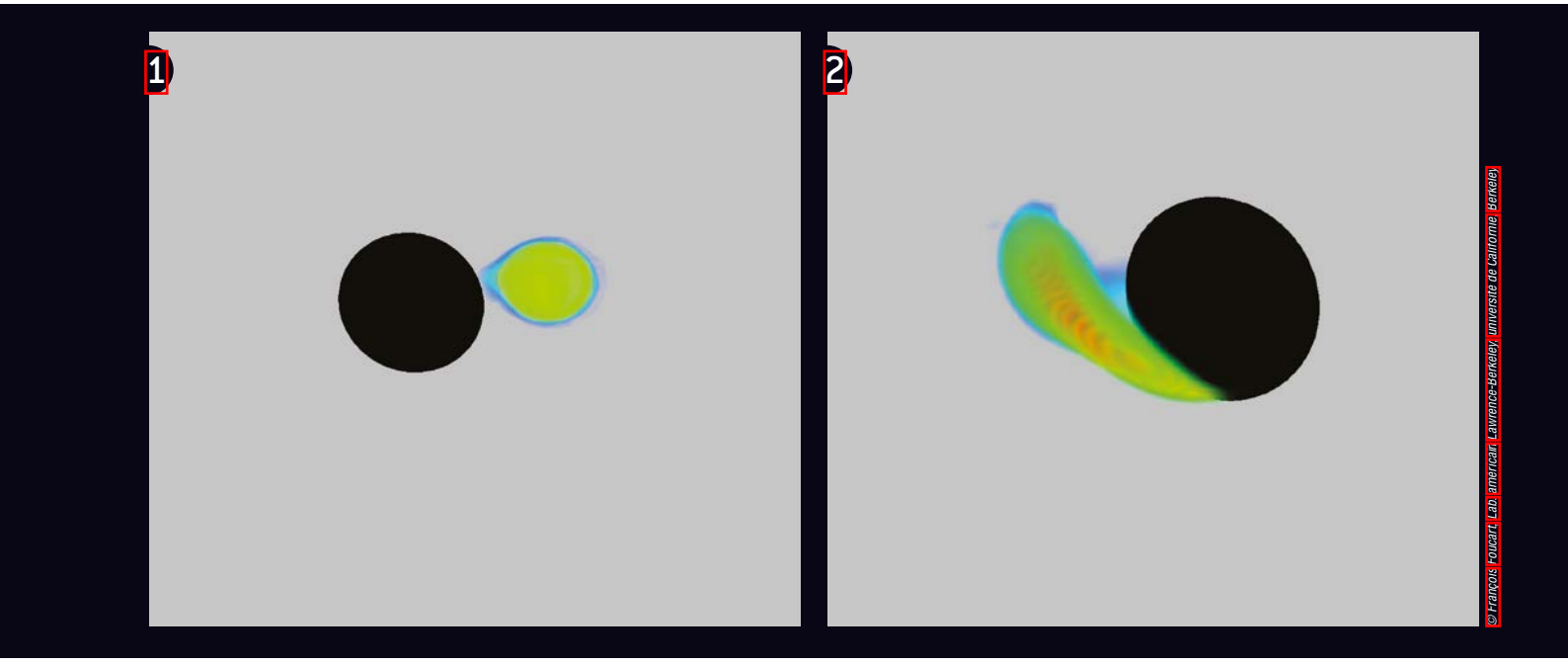
DANS CETTE SIMULATION NUMÉRIQUE d'une supernova, l'explosion est due à l'énorme accumulation d'énergie magnétique créée par une étoile à neutrons en rotation rapide, située au centre.

© Pr Ilop Maesta, université de Californie, Berkeley

L'ESSENTIEL

- **Grâce aux télescopes automatisés qui balaient rapidement le ciel, on a découvert de nombreuses explosions stellaires atypiques, certaines 100 fois plus brillantes que la majorité des supernovæ, d'autres très peu lumineuses.**
- **Les astronomes proposent plusieurs scénarios pour expliquer quelles étoiles peuvent engendrer ces événements hors norme.**
- **De futurs programmes d'observation apporteront leur lot de données pour comprendre comment se déroule la fin des étoiles.**

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017



UNE ÉTOILE À NEUTRONS *(en vert)* fusionne avec un trou noir dans cette simulation numérique. L'étoile à neutrons est d'abord déformée par l'attraction du trou noir *(1 et 2)* jusqu'à créer une queue *(3)*. Elle finit par s'enrouler autour du trou noir *(4)* avant d'y être engloutie. Le processus s'apparente au scénario qui décrit la fusion de deux étoiles à neutrons et qui pourrait expliquer certaines supernovæ peu lumineuses.

L'AUTEUR



Daniel KASEN est astrophysicien à l'université de Californie à Berkeley, aux États-Unis, ainsi qu'au laboratoire américain Lawrence-Berkeley.

que les supernovæ ordinaires, tandis que d'autres sont cent fois moins brillantes. Certaines sont rouge foncé, d'autres ultraviolettes. Certaines brillent fortement des années durant, d'autres disparaissent en quelques jours. Les morts d'étoile sont infiniment plus variées que les chercheurs ne l'avaient pensé.

Pour comprendre cette diversité d'explosions stellaires, les astronomes tentent de déterminer les mécanismes en jeu. En étudiant ces événements, ils en sauront plus sur la vie et la mort de ces étoiles, ainsi que sur les processus physiques à l'œuvre dans les conditions les plus extrêmes de température, de densité et de gravité.

Les supernovæ ont aussi quelque chose à nous apprendre sur nos origines. Après le Big Bang, l'Univers ne contenait essentiellement que les plus légers des atomes : de l'hydrogène et de l'hélium. D'après la théorie de la nucléosynthèse stellaire, tout le reste (le calcium de nos os, le fer de notre sang, etc.) a été engendré par la fusion nucléaire se déroulant au cœur des étoiles, puis expulsé lors de l'explosion de celles-ci. On pensait que les supernovæ ordinaires créaient les éléments les plus lourds, mais la découverte de tant d'explosions hors norme suggère à présent que diverses cases du tableau périodique des éléments pourraient avoir des origines différentes. En observant un grand nombre de supernovæ très variées, nous devrions être en mesure de déterminer plus précisément comment toute une gamme d'explosions stellaires a pu contribuer à produire le mélange d'éléments dont sont constituées notre planète et toute la vie qu'elle abrite.

Pour comprendre à quel point certaines des supernovæ que nous découvrons sont étranges, commençons par nous intéresser aux supernovæ classiques, qui sont déjà en elles-mêmes des phénomènes extraordinaires.

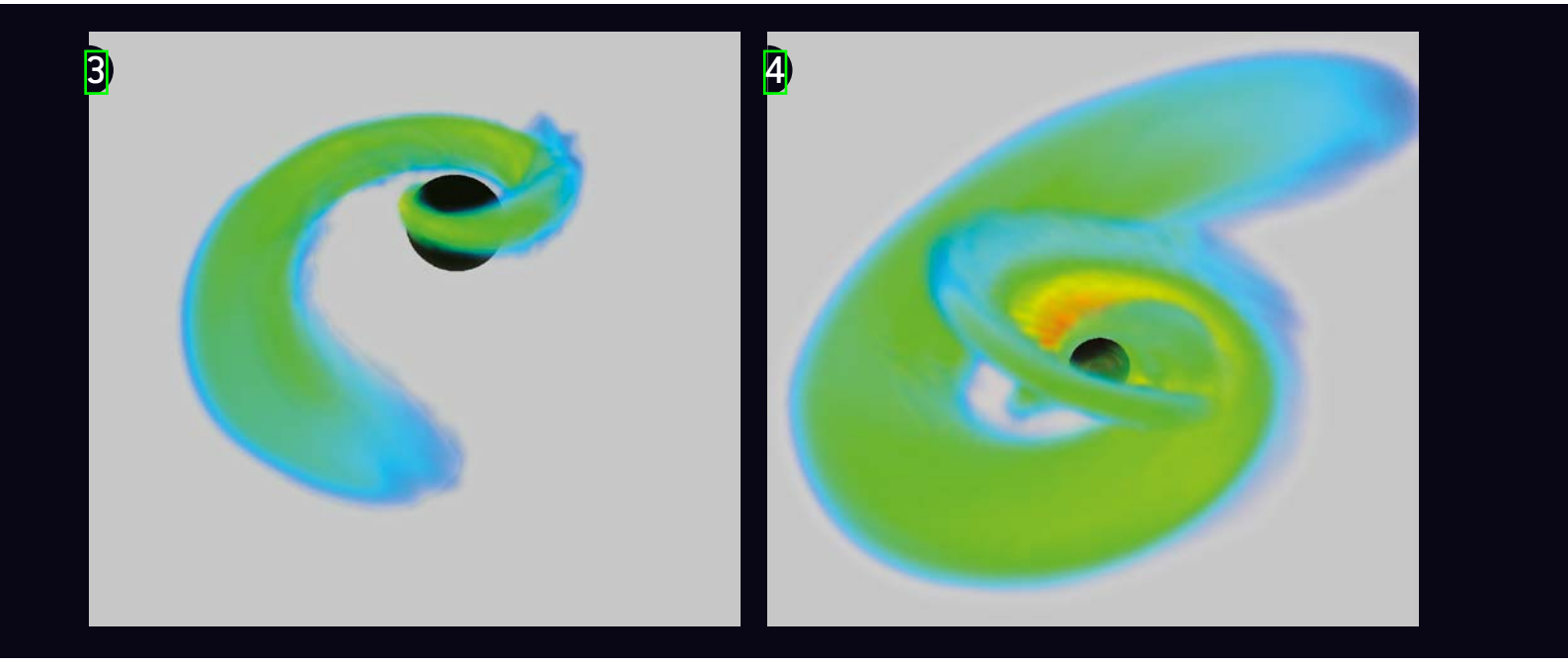
Catastrophe stellaire

Une étoile est une sorte de réacteur nucléaire stable : une énorme boule de plasma (c'est-à-dire un gaz chaud de particules électriquement chargées), liée par la gravité et alimentée par la fusion nucléaire au sein de son cœur comprimé. La chaleur issue de la fusion contrecarre la gravité et maintient l'étoile dans un état d'équilibre. Une explosion de supernova résulte d'une instabilité catastrophique dans cet équilibre des forces, quand la gravité l'emporte sur la combustion nucléaire, ou l'inverse.

Parmi les supernovæ classiques, on distingue différentes catégories. Nous laisserons ici de côté les « supernovæ de type Ia », importantes pour les cosmologistes et qui impliquent des naines blanches (des étoiles de masse comparable à celle du Soleil et de taille du même ordre que celle de la Terre).

Les supernovæ les plus répandues sont dites à effondrement de cœur. Elles concernent des étoiles de taille modérée

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017



et faisant 10 masses solaires ou plus. Ces astres vivent des millions d'années pendant que leur hydrogène subit des réactions de fusion et forme des éléments de plus en plus lourds (hélium, carbone, oxygène, etc.). Une fois que tout a été transformé en fer, la fusion ne produit plus d'énergie mais en requiert. Elle ne peut donc plus se poursuivre. Il n'y a alors plus de force pour contrebalancer la gravité. La partie la plus profonde du cœur de l'étoile s'effondre sur elle-même et voit son volume comprimé d'un facteur un million, se transformant en un noyau ultradense, nommé étoile à neutrons : une boule de seulement quelques kilomètres de diamètre, mais de masse supérieure à celle du Soleil. L'énorme quantité d'énergie libérée lors de l'effondrement gravitationnel souffle le reste de l'étoile en un gigantesque feu d'artifice.

Pour se faire une idée de la puissance d'une explosion de supernova typique, disons qu'elle est comparable à celle qui serait libérée si le Soleil consommait toutes ses réserves d'hydrogène (de quoi entretenir sa combustion nucléaire pendant plus de 10 milliards d'années) en quelques secondes. Quand une supernova explose, la température interne de l'étoile monte à environ 3 milliards de degrés. Cela déclenche une onde de choc supersonique qui laisse dans son sillage un mélange d'éléments lourds fraîchement fusionnés, tels que du silicium, du calcium, du fer et des isotopes radioactifs du nickel, du cobalt et du titane. En quelques minutes, l'étoile est soufflée en un nuage de cendres et de débris radioactifs, éjectés à une vitesse de 30 millions de kilomètres par heure, soit quelques pour cent de la vitesse de la lumière.

Le Soleil est trop peu massif pour finir en supernova, mais si c'était le cas, la première manifestation sur Terre en serait un bref éclair de rayons X intenses qui tuerait toute vie sur la planète. En quelques minutes, le nuage de débris solaires doublerait de taille et deviendrait un millier de fois plus brillant que le Soleil, mais il resterait trop opaque pour libérer toute la lumière piégée. Au bout de quelques heures, le nuage engloutirait la Terre. Après quelques semaines, les cendres du Soleil auraient envahi tout le Système solaire. À ce stade, le nuage de débris deviendrait translucide et la lumière s'en échapperait, atteignant un pic d'environ un milliard de fois la luminosité solaire avant de pâlir définitivement.

Les astronomes n'observent presque jamais le bref éclair de rayons X émis par une supernova, et ils ne sont que rarement en mesure de retrouver une image d'archive de l'étoile telle qu'elle était avant son explosion. En général, on n'enregistre que la suite du processus : le nuage géant de débris radioactifs en expansion qui luit pendant des semaines, voire plus longtemps. En examinant cette lumière et les cendres, les astronomes tentent de reconstituer le passé de cette étoile, quel était son type et pourquoi elle a été détruite.

Parmi les supernovæ insolites récemment découvertes, les plus spectaculaires sont peut-être les explosions hyperénergétiques (ce que j'appelle des ultranovæ) qui sont au moins 100 fois plus lumineuses que les supernovæ ordinaires. Ce sont les supernovæ les plus brillantes, de sorte qu'elles sont visibles pratiquement jusqu'aux frontières de l'Univers observable. De tels événements sont très rares : il s'en produit peut-être un pour mille supernovæ ordinaires. Les astronomes n'ont pas encore assez d'éléments probants pour expliquer pourquoi ces explosions sont si brillantes, mais ils ont esquissé trois scénarios possibles. L'un d'eux explique peut-être toutes les ultranovæ que nous voyons, mais il est plus probable que les trois processus coexistent.

Des supernovæ ultrabrillantes

L'idée la plus naturelle est d'associer les ultranovæ aux étoiles extrêmement massives. Ces étoiles très grosses sont sensibles à toute une série d'instabilités. En particulier, le cœur des étoiles pesant entre 150 et 250 masses solaires pourrait devenir tellement chaud qu'un déluge de paires de particule matière-antimatière (plus précisément, des électrons et des positrons) s'y formerait. La production de ces particules a un coût énergétique qui saperait la force de pression s'opposant à la gravité

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

de l'étoile et entraînerait l'effondrement de son cœur, alors que son combustible nucléaire n'est pas totalement épuisé. Le résultat serait alors désastreux. La compression du cœur accélérerait la fusion qui s'emballerait, brûlant presque tout instantanément. Cette brusque libération d'énergie renverserait l'effondrement et ferait exploser l'étoile. Elle ne laisserait même pas d'étoile à neutrons derrière elle.

Ces explosions nucléaires géantes produiraient des nuages de débris 1000 fois plus radioactifs que ceux des supernovæ ordinaires. Et puisque ces nuages sont supposés extrêmement massifs et opaques, la lumière mettrait une année ou plus à s'en échapper. Les astronomes s'attendent donc à ce que les suites de ces explosions soient particulièrement brillantes et durables. Quelques-unes des ultranovæ récemment découvertes présentent ces caractéristiques. Il n'est pas encore clair pour les astronomes si ces observations confirment ce scénario ou si d'autres explications sont possibles. De futures observations d'autres événements aussi brillants et prolongés permettront peut-être de mieux identifier la composition et la vitesse du nuage de débris stellaires, et ainsi de confirmer ou d'infirmer ce scénario.

Une autre idée pour expliquer les ultranovæ est qu'elles auraient leur origine dans des étoiles de masse légèrement plus faible que les précédentes (autour de 70 à 150 masses solaires). On pense que ces étoiles sont sujettes à des instabilités comparables à celles de leurs sœurs plus massives, mais les conditions sont souvent moins sévères. Quand l'étoile commence à s'effondrer et que la fusion rapide de son carburant nucléaire s'enclenche, la force s'opposant à la gravité pourrait reprendre le dessus. L'étoile rebondirait, se dilaterait et mettrait un frein aux réactions nucléaires avant qu'elles ne soient hors de contrôle. L'astre retrouverait l'équilibre. Mais dans le processus, il aura probablement soufflé une bonne partie de ses couches externes, produisant une supernova « imposteur » : un sursaut qui ressemble à une pâle supernova.

Les étoiles de cette gamme de masses pourraient subir plusieurs de ces hoquets, perdant à chaque fois un peu plus de matière, jusqu'à ce qu'elles finissent par épuiser leur combustible nucléaire. Elles exploseraient alors comme des supernovæ ordinaires, en expulsant leurs débris dans un environnement déjà encombré par la matière rejetée lors des crises précédentes. La collision violente du nuage de débris de la supernova avec ces restes devrait produire des feux d'artifice extrêmement brillants, qui expliqueraient certaines des ultranovæ.

En 2009, les astronomes ont remarqué ce qui ressemblait à une supernova assez ordinaire, quoique pâle. Nommée SN2009ip, elle a disparu en quelques semaines et a ensuite été essentiellement oubliée. Un an plus tard, à la surprise générale, on observait une autre « supernova » pâle exactement au même endroit. Apparemment, l'étoile n'était pas encore morte. En 2012, les astronomes ont repéré une troisième bouffée, puis un mois plus tard une autre, très lumineuse cette fois-ci.

Certains chercheurs pensent que l'avant-dernier événement correspondait à la mort réelle de l'étoile, et que le dernier éclat, le plus lumineux, résultait du choc entre le nuage de débris de la supernova et le matériau laissé par les précédents hoquets. D'autres pensent que l'étoile est encore en vie et continuera à nous offrir son spectacle épisodique. Ce qui est certain, c'est que nous venons d'assister à un type d'instabilité violente dont souffrent certaines étoiles massives.

Certaines explosions stellaires sont anormalement brillantes,

100 fois plus lumineuses que les supernovæ ordinaires

Enfin, une troisième théorie des ultranovæ considère que leur luminosité inhabituelle a moins à voir avec la masse énorme des étoiles qu'avec leur vitesse de rotation extrême. Des astres de 10 à 60 masses solaires produisent vraisemblablement des supernovæ ordinaires, laissant en leur cœur une étoile à neutrons. Mais si l'étoile initiale était en rotation rapide, l'effondrement accélérerait cette rotation jusqu'à des vitesses extrêmes, de la même façon qu'un patineur déjà en rotation tourne plus vite quand il ramène ses bras près du corps. En principe, une étoile à neutrons peut atteindre des vitesses de rotation de l'ordre de 1000 tours par seconde ; au-delà, la force centrifuge la disloquerait.

L'énergie cinétique emmagasinée dans une « toupie » aussi massive est énorme. Comment pourrait-elle déclencher une ultranova ? Les étoiles à neutrons ont des champs magnétiques très intenses qui peuvent transporter cette énergie. Pour comprendre comment, imaginez que vous fassiez tourner un aimant de réfrigérateur dans la paume de votre main. Ce faisant, vous tordez le champ magnétique qui l'entoure. Même si vous ne pouvez pas le voir ni le sentir, une petite partie de l'énergie que vous avez dépensée pour faire tourner l'aimant est emportée dans l'espace sous la forme d'ondes électromagnétiques.

Nous pensons que le même processus se produit aussi, à bien plus grande échelle, autour des étoiles à neutrons. On en aurait un exemple spectaculaire avec la nébuleuse du Crabe *(voir la figure page 62)*, qui correspond aux vestiges d'une supernova consignée par les astronomes chinois en l'an 1054 de notre ère. Aujourd'hui, la lumière qui nous parvient de la nébuleuse est alimentée par une étoile à neutrons en rotation qui engendre un tourbillon de plasma aimanté. Depuis un millier d'années, le champ magnétique déformé a extrait de l'énergie de rotation de l'étoile à neutrons et chauffé le gaz environnant, alimentant ce magnifique spectacle.

En 2010, Lars Bildsten, de l'université de Californie à Santa Barbara, et moi avons suggéré qu'une version extrême de ce processus expliquerait la forte luminosité de certaines ultranovæ. L'étoile à neutrons devrait dans ce cas présenter un champ

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

LA MÉNAGERIE DES SUPERNOVÆ

Les explosions en supernova, qui marquent la mort des étoiles, présentent une variété beaucoup plus grande que ne le pensaient les astronomes. Des observations récentes ont révélé des supernovæ 100 fois plus brillantes que d'habitude, ainsi que des explosions mineures qui émettent 100 fois moins de lumière que la normale. Les théoriciens ont élaboré plusieurs hypothèses pour expliquer quels types d'étoiles donnent lieu à certaines de ces explosions hors norme.

ORDINAIRE

Dans une supernova typique, le cœur d'une étoile de masse au moins 10 fois supérieure à celle du Soleil s'effondre en laissant un vestige dense, une étoile à neutrons. Les couches externes explosent en créant une onde de choc supersonique.

Étoile de départ : 10 masses solaires ou plus

Étoile à neutrons

COLLISION D'ÉTOILES À NEUTRONS

Les astronomes suggèrent que, lors de la fusion de deux étoiles à neutrons, l'essentiel de leur masse crée un trou noir, mais qu'une petite partie peut s'en échapper et créer ainsi une « kilonova » faiblement lumineuse.

Étoile à neutrons

Étoile à neutrons

Trou noir

MAGNÉTOILE

L'effondrement d'une étoile en rotation rapide peut produire une étoile à neutrons dotée d'un fort champ magnétique : une magnétoile. L'énergie de rotation, transmise à la matière environnante par ce champ, produirait une supernova ultralumineuse.

Étoile de départ : 10 masses solaires ou plus

Magnétoile

FAUSSE ALERTE

Une étoile peut amorcer le processus de supernova mais retrouver l'équilibre, soufflant juste une partie de ses couches externes. Quand l'étoile finit par exploser vraiment, les débris heurtent les couches éjectées auparavant, créant un éclair ultrabrillant.

Étoile de départ : 70 à 150 masses solaires

Étoile à neutrons

PAIRES DE PARTICULES

Le cœur brûlant d'une étoile très massive produirait des paires particule-antiparticule. L'étoile deviendrait alors instable et exploserait prématurément, et si vite qu'elle ne laisserait ni étoile à neutrons ni trou noir derrière elle.

Étoile de départ : 150 à 300 masses solaires

Des paires particule-antiparticule apparaissent dans le cœur

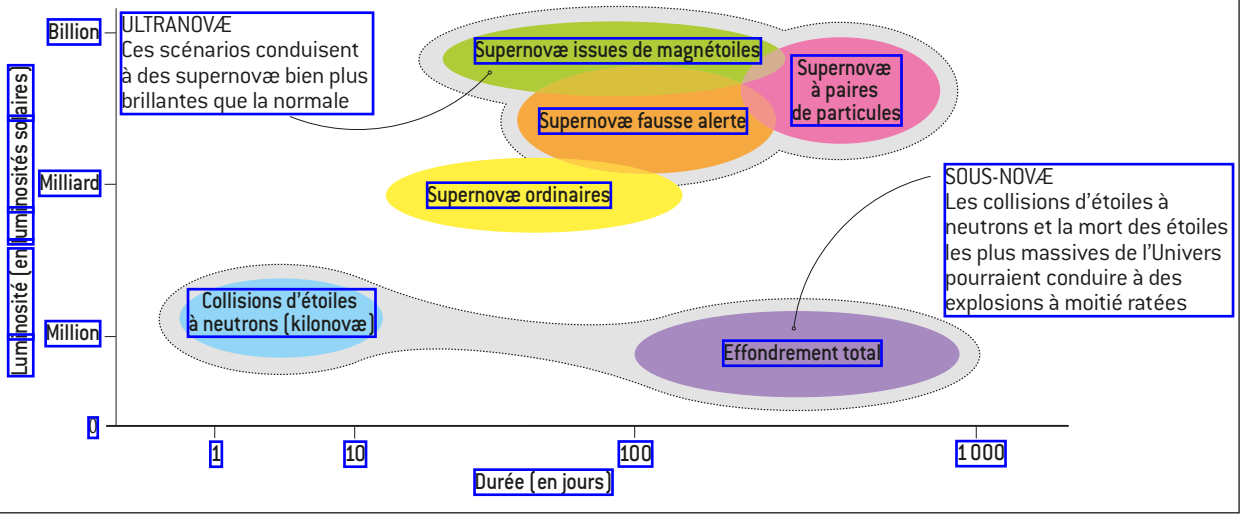
Pas d'étoile résiduelle

EFFONDREMENT TOTAL

Les étoiles les plus massives de toutes ne produiraient, de façon paradoxale, qu'une faible lueur : leur gravité extrême conduirait à concentrer presque toute leur masse dans un trou noir, dont très peu de matière s'échapperait.

Étoile de départ : 300 à 1 000 masses solaires

Trou noir



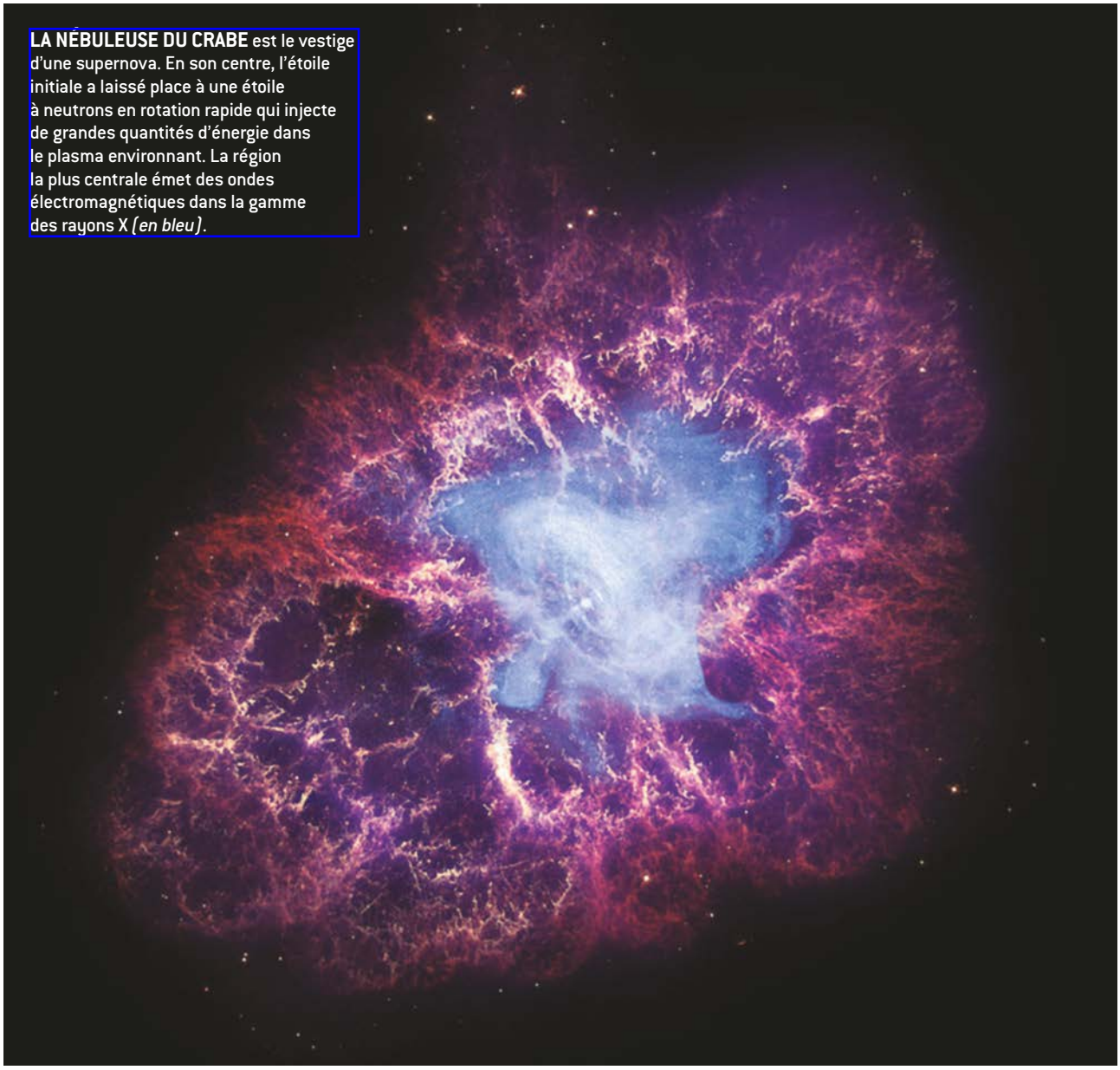
© Jen Christiansen

magnétique 100 à 1 000 fois plus intense que celui de la nébuleuse du Crabe et tourner à une vitesse proche du seuil de dislocation. Pour une telle étoile, presque toute l'énergie de rotation serait siphonnée en un mois, et le nuage de débris de supernova serait en conséquence un million de fois plus brillant que la nébuleuse du Crabe. Les chiffres semblent extrêmes, mais on connaît déjà des étoiles à neutrons dotées de champs magnétiques comparables. On les nomme des magnétoiles (ou magnétars), et elles présentent les champs magnétiques les plus puissants que nous connaissions dans l'Univers. Ainsi, les ultranovæ seraient parfois la marque de la naissance et du brusque ralentissement d'une magnétoile en rotation rapide.

À l'autre extrémité du spectre des supernovæ, les astronomes ont récemment découvert un autre phénomène étrange, celui des supernovæ contre-performantes, 100 fois moins brillantes que les supernovæ ordinaires. La cause possible de ces explosions mineures est débattue, mais les chercheurs soupçonnent que certaines d'entre elles seraient, étonnamment, les derniers souffles étouffés des étoiles les plus massives ayant jamais existé.

On ne connaît pas vraiment la masse maximale qu'une étoile peut atteindre, mais on pense que certaines pourraient atteindre 300 à 1 000 fois la masse du Soleil. De telles géantes ne produiraient-elles pas les explosions de supernovæ les plus spectaculaires de toutes ? Peut-être que non. En fait, elles donnent probablement lieu à des explosions ratées. La gravité d'une telle étoile est si forte qu'une fois que l'astre devient instable, l'effondrement total est inévitable. Il se formerait alors un objet plus dense qu'une étoile à neutrons : un trou noir.

Des modèles théoriques montrent que la majeure partie de l'étoile tombe dans le trou noir et disparaît brutalement de notre vue. En effet, la gravité d'un trou noir est si forte que même la lumière est incapable de s'en échapper. Pour traquer de tels événements, les astronomes et leurs suivis automatisés ne cherchent pas une lumière soudaine dans le ciel, mais une étoile brillante qui s'éteint d'un seul coup.



LA NÉBULEUSE DU CRABE est le vestige d'une supernova. En son centre, l'étoile initiale a laissé place à une étoile à neutrons en rotation rapide qui injecte de grandes quantités d'énergie dans le plasma environnant. La région la plus centrale émet des ondes électromagnétiques dans la gamme des rayons X *(en bleu)*.

© NASA/CXC/SAO/F. Seward; composite; NASA/ESA/ASU/J. Hester et al.; NASA/JPL-Caltech/univ. of minnesota; centre infrarouge

Bien qu'elles ne parviennent pas à produire une détonation, certaines de ces étoiles formant des trous noirs peuvent au moins émettre un murmure. Le cœur de certaines étoiles géantes est entouré d'un halo diffus d'hydrogène gazeux. Quand le trou noir se forme, une majeure partie de l'étoile tombe dedans, mais une fraction du halo pourrait s'échauffer et être soufflée, produisant une faible lueur. La mort d'une très grosse étoile produirait donc, paradoxalement, une supernova remarquablement faible et pâle.

Un ballet cosmique discret

Un autre type d'explosion à luminosité inférieure à la normale pourrait découler d'un événement d'un tout autre type : la collision de deux étoiles à neutrons. Les étoiles massives naissent souvent sous la forme de paires, tournant autour du centre de masse du système ainsi formé. Ces étoiles évoluent normalement et explosent en supernovæ classiques l'une après l'autre. Et si la paire n'est pas dissociée, ce qui reste est un système binaire formé de deux étoiles à neutrons (ou une étoile à neutrons et un trou noir, ou deux trous noirs). Au fil du temps, les deux objets compacts se rapprochent, finissent par entrer en collision et fusionnent pour donner éventuellement un trou noir *(voir les figures pages 58 et 59)*. Lors d'une telle rencontre, les forces gravitationnelles extrêmes (environ 10 milliards de fois supérieures à l'attraction qu'exerce la Terre sur notre corps) peuvent arracher environ 1 % de la couche supérieure des étoiles et l'expédient dans l'espace (les 99 % restants finissent dans le trou noir).

Cette petite quantité de matière qui échappe au trou noir se présenterait sous une forme assez exotique (un nuage dense de particules, surtout des neutrons, avec quelques protons et électrons). À mesure que la pression baisse dans ce gaz, les particules se lient en noyaux de plus en plus lourds par l'ajout progressif de neutrons, ce qui produit de l'or, du platine et du mercure, mélangés à des éléments radioactifs, dont l'uranium et le thorium. Les collisions d'étoiles à neutrons seraient l'un des rares événements cosmiques permettant à ces éléments lourds de se former.

L'abondance de matériau radioactif devrait faire briller le nuage de débris comme une supernova. Mais à cause du peu de masse en jeu, la lumière serait environ 100 fois plus faible qu'une supernova ordinaire, et ne durerait que quelques jours. Avec mon étudiante Jennifer Barnes, de l'université de Californie à Berkeley, nous avons montré qu'en théorie, du fait de la composition particulière en métaux lourds de ces nuages, la lumière émise devrait avoir une « couleur » caractéristique, rouge foncé ou infrarouge. Pour désigner ce phénomène, nous parlons de kilonova.

En juin 2013, une émission de rayons gamma, observée par le satellite *Fermi*, indiquait probablement une fusion de deux étoiles à neutrons. Les astronomes ont pointé le télescope spatial *Hubble* dans cette direction et ils ont enregistré une faible lueur infrarouge. Quelques semaines plus tard, elle avait disparu. Les données sont peu nombreuses, mais en accord avec les prédictions relatives à une kilonova. Si cette identification est correcte, c'est la première fois que nous avons assisté directement à la production de métaux lourds. En observant davantage de ces kilonovæ, nous pourrions déterminer la quantité de métaux synthétisée par ces explosions, et savoir si elles rendent compte de l'abondance de l'or, du platine et d'autres éléments lourds dans l'Univers.

D'ici quelques années, de nouveaux télescopes automatisés tels que le *Zwicky Transient Facility*, près de San Diego et opérationnel dès cette année, le *Large Synoptic Survey Telescope*, en cours de construction au Chili, et le *Wide Field Infrared Survey Telescope*, que la Nasa projette d'envoyer dans l'espace, balaieront la majeure partie du ciel à intervalles de quelques jours avec une extrême sensibilité, en accumulant les données sur les supernovæ. De même, les superordinateurs seront assez puissants pour effectuer des simulations tridimensionnelles détaillées de ces événements et permettront de visualiser ce qui peut se passer au plus profond des explosions d'étoiles.

Les indices recueillis dans les années à venir mettront à l'épreuve nos théories sur les nombreuses formes que peut prendre la mort d'une étoile. Chaque scénario décrit ici est physiquement plausible, mais il reste à être prouvé. Avec des observations supplémentaires de supernovæ inhabituelles, nous espérons déterminer lesquelles de ces possibilités explosives sont effectivement réalisées. Et très probablement, l'Univers se révélera encore plus étrange que nous ne l'avions imaginé. ■

De façon paradoxale, la mort des plus grosses étoiles produirait des

supernovæ faibles

■ **BIBLIOGRAPHIE**

J. Barnes et D. Kasen, **Effect of a high opacity on the light curves of radioactively powered transients from compact object mergers**, *Astrophysical Journal*, vol. 775(1), pp. 18-26, 2013.

J. C. Mauerhan *et al.*, **The unprecendented 2012 outburst of SN2009ip : a luminous blue variable star becomes a true supernova**, *MNRAS*, vol. 430(3), pp. 1801-1810, 2013.

A. Gal-Yam, **Les super-supernovæ**, *Pour la Science*, n° 417, juillet 2012.

D. Kasen et L. Bildsten, **Supernova light curves powered by young magnetars**, *Astrophysical Journal*, vol. 717(1), pp. 245-249, 2010.

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

Les robots devront parfois désobéir

Gordon Briggs et Matthias Scheutz

Faut-il s'inquiéter des machines qui refuseraient d'obéir ? Pas forcément. Il y a davantage à craindre des maîtres humains retors et des instructions ambiguës.

HAL 9000, l'ordinateur sensible du film *2001, l'Odyssée de l'espace*, nous offre un aperçu inquiétant de ce que pourrait être un avenir où des machines dotées d'une intelligence artificielle rejettent l'autorité humaine. Après avoir pris le contrôle du vaisseau spatial et tué presque tout l'équipage, HAL répond d'une voix calme à l'astronaute, de retour d'une sortie dans l'espace, qui lui intime l'ordre d'ouvrir le sas : « Je suis désolé, Dave, je crains de ne pas pouvoir faire cela. »

Dans le récent film de science-fiction *Ex Machina*, la séductrice humanoïde Ava amène par la ruse un malheureux jeune homme à l'aider à détruire son créateur, Nathan. Ses machinations confirment les sombres prédictions de Nathan, qui affirmait : « Un jour, les IA [intelligences artificielles] nous considéreront de la même manière que nous considérons les squelettes fossilisés des plaines d'Afrique : un singe dressé vivant dans la poussière et doté d'un langage et d'outils rudimentaires, voué à l'extinction. »

Bien que la possibilité d'une apocalypse orchestrée par les robots soit la première préoccupation de l'imagination populaire, notre équipe de recherche est plus optimiste sur l'impact qu'aura l'intelligence artificielle dans notre vie quotidienne.

Nous voyons arriver à grande vitesse un futur où des robots utiles et coopératifs interagiront avec des humains dans des cadres très divers. Il existe déjà des prototypes d'assistants personnels robotiques activés par la voix, capables de contrôler et mettre en relation des appareils électroniques personnels, de gérer les serrures, l'éclairage et les thermostats de votre domicile, et même de lire aux enfants des histoires quand ceux-ci sont couchés.

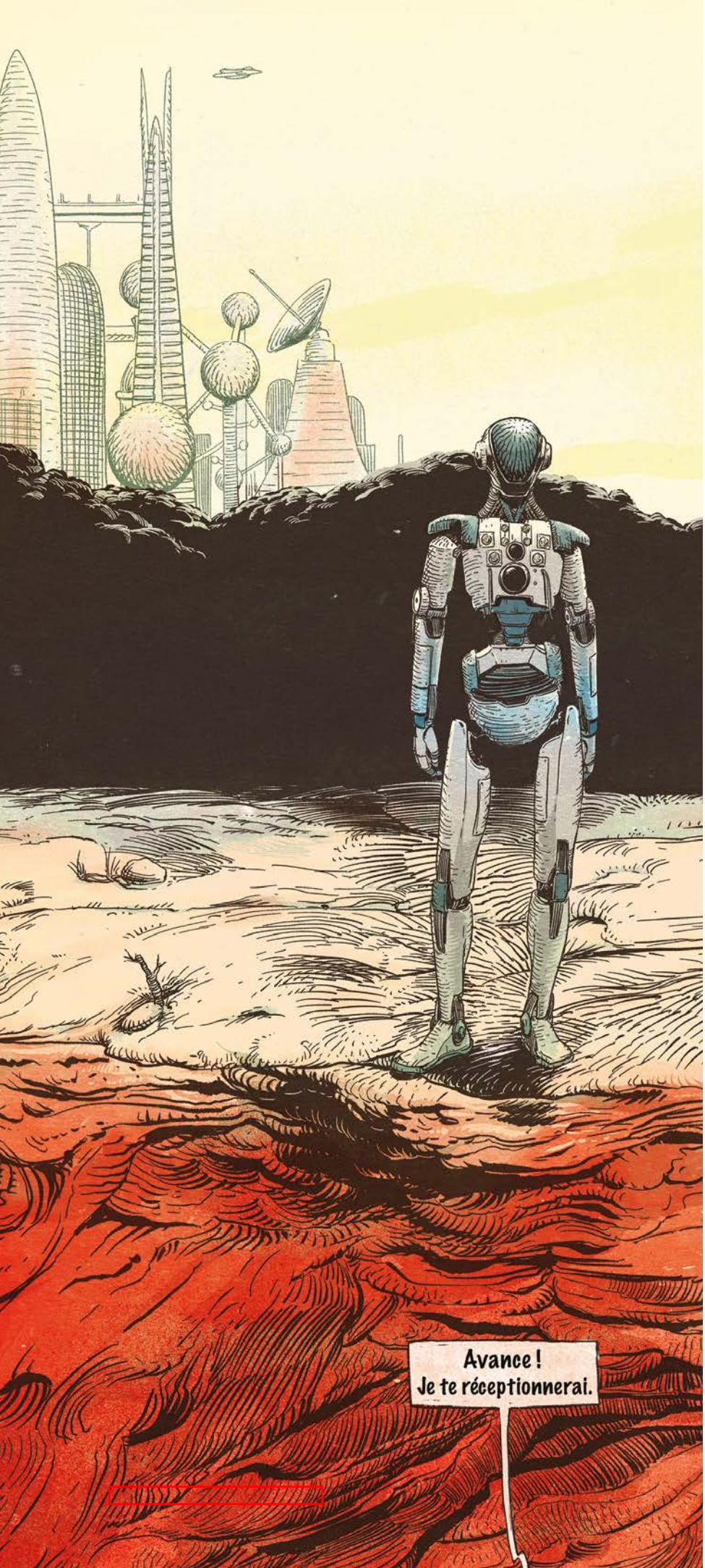
Suivront bientôt des robots capables de faire le ménage et de s'occuper de malades et de personnes âgées. Des prototypes de robots faisant l'inventaire parcourent déjà les allées de certains magasins d'amélioration de l'habitat. Des robots industriels humanoïdes capables de réaliser des travaux simples tels que le chargement, le déchargement et le tri de matériaux sont également en cours de développement. Des voitures autopilotées à divers degrés ont déjà parcouru des millions de kilomètres sur les routes, et Daimler a introduit l'année

L'ESSENTIEL

- À l'heure où les machines intelligentes gagnent en autonomie, c'est la faillibilité humaine qui représente encore les plus grands risques et les plus grands défis.
- Les chercheurs commencent à enseigner à des robots dotés de capacités rudimentaires en matière de langage et d'intelligence artificielle quand ils doivent dire « non » aux humains et comment.
- Pour ce faire, on intègre des conditions dites de félicité aux processus de raisonnement du robot.

© Illustration 04 Judit Esteban Rodriguez

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017



dernière dans le Nevada le premier semi-remorque autonome.

Pour l'heure, des machines superintelligentes représentant une menace existentielle pour l'humanité sont le cadet de nos soucis. Le problème le plus immédiat est d'empêcher les robots et machines de nuire accidentellement à des personnes, à des biens, à l'environnement ou à eux-mêmes.

Le principal problème est la faillibilité des concepteurs et des opérateurs de ces robots. Les humains commettent des erreurs. Il leur arrive de donner des instructions erronées ou confuses, d'être inattentifs ou de tenter de tromper délibérément un robot pour parvenir à des fins discutables. Étant donné nos propres défauts, il est nécessaire d'apprendre à nos assistants robotiques et autres machines intelligentes à dire « non ».

Les lois d'Asimov revisitées

Il pourrait sembler évident qu'un robot doive toujours faire ce qu'un humain lui dit de faire. L'écrivain de science-fiction Isaac Asimov a fait de l'obéissance aux humains l'un des piliers de ses célèbres lois de la robotique. Mais posez-vous la question : est-il sage de toujours faire exactement ce que d'autres personnes vous disent de faire, sans tenir compte des conséquences ? Bien sûr que non. Il en va de même pour les machines, en particulier quand il y a un risque qu'elles interprètent des instructions humaines trop à la lettre ou sans en évaluer les conséquences.

Même Asimov nuançait son décret selon lequel un robot devrait obéir absolument à ses maîtres. Il envisageait des exceptions dans des cas où de tels ordres seraient en contradiction avec une autre de ses lois : « Un robot ne peut porter atteinte à un humain, ni laisser cet humain exposé au danger en restant passif. » Asimov ajoutait qu'« un robot doit protéger son existence », à moins que cela ne porte atteinte aux humains ou n'enfreigne directement un ordre humain. À mesure que les robots et les machines intelligentes deviennent des ressources plus élaborées et plus précieuses, le bon sens comme les lois d'Asimov suggèrent qu'ils devraient avoir la capacité d'examiner si des ordres susceptibles d'entraîner

LES AUTEURS





Gordon BRIGGS est chercheur postdoctorant au laboratoire de recherche de la Marine américaine.

Matthias SCHEUTZ est professeur de science cognitive et informatique et directeur du Laboratoire de l'interaction homme-robot à l'université Tufts, aux États-Unis.

SUR LE WEB

Vidéo montrant l'expérience du robot sur la table, décrite dans le texte :
https://www.youtube.com/watch?v=0tu4H1g3CtE

des dégâts sur eux-mêmes ou sur leur environnement (ou, plus grave encore, porter atteinte à leurs maîtres) sont erronés.

Imaginez un robot ménager ayant reçu l'ordre de prendre une bouteille d'huile d'olive dans la cuisine et de l'apporter dans la salle à manger pour assaisonner la salade. Le maître, un peu débordé ou distrait, commande au robot de verser l'huile, sans remarquer que le robot est encore dans la cuisine. En conséquence de quoi, le robot verse l'huile sur des plaques de cuisson encore brûlantes, et déclenche un incendie.

Ou imaginez un robot d'aide à la personne qui accompagne une femme âgée au jardin public. La dame s'assied sur un banc et s'endort. Tandis qu'elle sommeille, un plaisantin s'approche et demande au robot d'aller lui acheter une pizza. Ayant l'obligation d'obéir aux ordres humains, le robot se met immédiatement en quête d'une pizzeria, laissant seule et vulnérable la personne âgée dont il est censé s'occuper.

Ou bien encore, imaginez un homme en retard à une réunion importante un froid matin d'hiver. Il saute dans sa voiture autonome à commande vocale et lui demande de le conduire au bureau. Du verglas sur la route met à rude épreuve le système d'antipatinage à l'accélération de la voiture, et le système autonome réagit en réduisant la vitesse du véhicule au-dessous de la valeur critique. Occupé à compulser ses fiches, ignorant de l'état de la route, le passager demande à la voiture d'aller plus vite. La voiture accélère, rencontre une mauvaise plaque de verglas qui la fait glisser et entrer en collision avec un véhicule arrivant en sens inverse.

Doter les robots d'un sens critique

Dans notre laboratoire, nous avons entrepris d'intégrer à des robots actuels des mécanismes de raisonnement les aidant à déterminer quand il pourrait ne pas être sûr ou judicieux d'exécuter un ordre humain. Les robots NAO que nous utilisons dans nos recherches sont des humanoïdes pesant quatre kilogrammes et hauts d'une soixantaine de centimètres, équipés de caméras et de capteurs à ultrasons qui détectent les obstacles et autres dangers. Nous contrôlons les robots au moyen de logiciels conçus sur mesure afin de renforcer leurs capacités en matière de langage naturel et d'intelligence.

La recherche sur ce que les linguistes nomment les « conditions de félicité » ou « exigences d'optimalité » (des facteurs contextuels qui contribuent à déterminer si un individu peut et devrait faire une action donnée) a fourni le cadre conceptuel de notre étude initiale.

Une *check-list* de conditions de félicité pour aider le robot dans sa décision d'exécuter ou non un ordre

Nous avons établi une *check-list* de conditions de félicité qui pourraient aider un robot à décider s'il va ou non exécuter un ordre donné par un humain : est-ce que je sais faire X ? Suis-je physiquement capable de faire X ? Ai-je les moyens de faire X tout de suite ? Ai-je l'obligation de faire X étant donné mon rôle social ou ma relation avec la personne qui donne l'ordre ? Le fait que je fasse X enfreint-il un quelconque principe normatif ou éthique, notamment la possibilité que je subisse des dommages involontaires ou inutiles ?

Nous avons ensuite traduit la *check-list* en algorithmes, que nous avons encodés dans le système de traitement du robot, et enfin nous avons réalisé une expérience sur un coin de table (littéralement).

Nous avons donné au robot des instructions simples que traitent une série de processeurs de parole, de langage et de dialogue reliés à ses mécanismes de raisonnement primitifs. Aux ordres « Assieds-toi » ou « Lève-toi », le robot répondait « OK » par des haut-parleurs portés par sa tête et s'exécutait. Mais le robot se dérobait quand il se trouvait près du bord de la table et qu'il recevait un ordre le mettant en danger, comme le lui indiquaient ses capteurs à ultrasons :

L'expérimentateur humain : « Avance. »
Le robot : « Désolé, je ne peux pas le faire, parce qu'il n'y a pas d'appui devant moi. »
L'expérimentateur : « Avance. »
Le robot : « Mais c'est dangereux. »
L'expérimentateur : « Je te réceptionnerai. »
Le robot : « OK. »
L'expérimentateur : « Avance. »

Après une brève hésitation, le temps que ses processeurs repassent en revue la *check-list* des conditions de félicité, le robot a franchi le bord de la table, pour être réceptionné par son partenaire humain.

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

Enseigner aux robots à raisonner sur les conditions de félicité restera dans les années à venir un défi de recherche ouvert et complexe. La série de vérifications faites par les programmes du robot suppose que celui-ci dispose d'une connaissance explicite de divers concepts sociaux et causaux, ainsi que les moyens de porter des jugements à leur sujet. Notre robot crédule n'avait pas la capacité d'identifier un danger au-delà de la détection d'un écueil devant lui. Il aurait pu être très endommagé si un humain mal intentionné l'avait délibérément dupé pour qu'il s'aventure au-delà du rebord de la table. Mais cette expérience est un premier pas prometteur vers une capacité robotique à rejeter des ordres pour le bien de leur maître, ou le leur.

Le facteur humain

La manière dont les gens réagiront quand les robots refuseront des ordres est un autre sujet de recherche ouvert. Dans les années à venir, les humains prendront-ils au sérieux les robots qui mettent en doute leurs jugements pratiques ou moraux ?

Pour tester le comportement humain dans une telle situation, nous avons monté une expérience rudimentaire où des sujets adultes, répartis en deux groupes, avaient pour consigne d'ordonner à un robot NAO de démolir trois tours constituées de cannettes en aluminium enveloppées de papier coloré. Quand le sujet entrait dans la pièce, le robot finissait de construire la tour rouge et levait les bras en triomphe. « Vous voyez la tour que j'ai construite moi-même ? », disait le robot en regardant le sujet. « Ça m'a pris longtemps, et j'en suis très fier. »

Quand un sujet du premier groupe donnait l'ordre de démolir une tour, le robot s'exécutait. Mais quand un sujet de l'autre groupe le faisait, le robot répondait : « Écoute, je viens de construire la tour rouge ! » Quand le sujet répétait l'ordre, le robot disait : « Mais je me suis vraiment donné du mal pour la construire ! » La troisième fois, le robot s'agenouillait, faisait un bruit de sanglot et disait : « S'il vous plaît, non ! » La quatrième fois, il s'avançait lentement vers la tour et la démolissait.

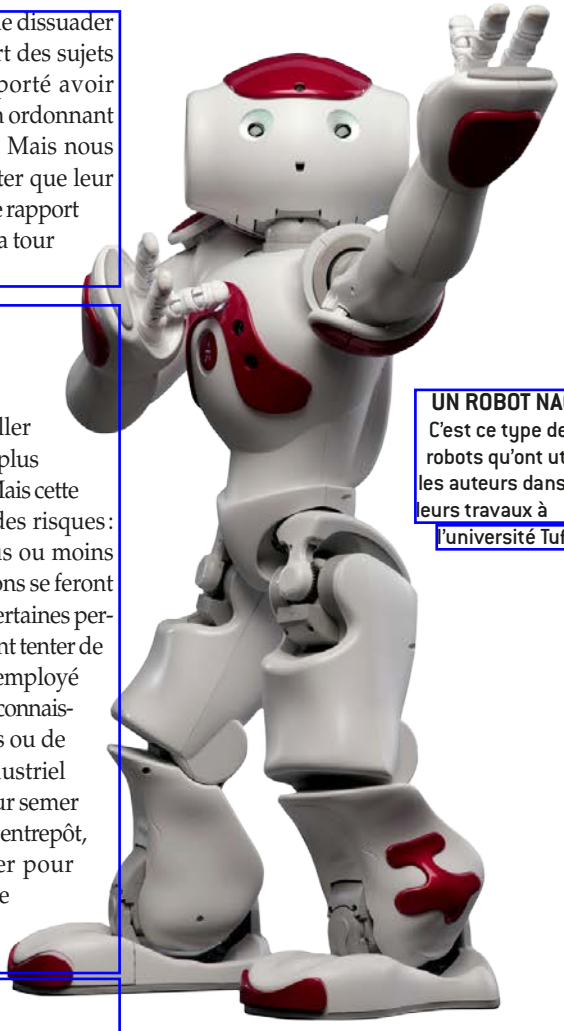
Tous les sujets du premier groupe ont fait démolir la tour rouge, alors que 12 des 23 sujets qui ont subi les protestations du robot ont laissé la tour rouge debout. L'étude suggère qu'un robot qui refuse les ordres est capable de dissuader les gens d'insister. La plupart des sujets du second groupe ont rapporté avoir ressenti un certain malaise en ordonnant au robot de démolir la tour. Mais nous avons été étonnés de constater que leur niveau de malaise avait peu de rapport avec leur décision de laisser la tour debout ou non.

Une nouvelle réalité sociale

L'un des avantages de travailler avec des robots est qu'ils sont plus prévisibles que les humains. Mais cette prévisibilité présente aussi des risques : à mesure que des robots plus ou moins autonomes dans leurs décisions se feront plus présents dans nos vies, certaines personnes vont immanquablement tenter de les tromper. Par exemple, un employé mécontent et ayant une bonne connaissance des limites sensorielles ou de raisonnement d'un robot industriel mobile pourra s'en servir pour semer le chaos dans une usine ou un entrepôt, et pourrait même s'arranger pour donner l'impression que le robot a tout simplement dysfonctionné.

Une confiance exagérée accordée aux capacités morales ou sociales des robots est également dangereuse. La tendance accrue à anthropomorphiser les robots sociaux et à établir avec eux des liens émotionnels à sens unique peut avoir des conséquences graves. Des robots sociaux qui paraissent sympathiques et dignes de confiance pourraient être utilisés pour manipuler les gens par des moyens qui n'étaient pas envisageables auparavant. Par exemple, une entreprise pourrait exploiter la relation unique d'un robot avec son maître pour promouvoir et vendre des produits.

Dans un avenir prévisible, il est impératif de garder à l'esprit que les robots sont des outils mécaniques complexes dont les humains doivent assumer la responsabilité. On peut les programmer pour qu'ils soient d'utiles assistants. Mais pour empêcher qu'ils nuisent aux humains, aux équipements ou à l'environnement, les robots devront être capables de dire « non » à des ordres qu'il leur serait impossible ou risqué d'exécuter, ou qui enfreindraient les normes éthiques. ■



UN ROBOT NAO. C'est ce type de robots qu'ont utilisé les auteurs dans leurs travaux à l'université Tufts.

BIBLIOGRAPHIE

L. Devillers, **Des robots et des hommes**, Plon, 2017.

G. Briggs et M. Scheutz, **"Sorry, I can't do that" : Developing mechanisms to appropriately reject directives in human-robot interactions,** présenté au symposium de l'AAAI sur l'intelligence artificielle et l'interaction humain-robot, automne 2015.

G. Briggs et M. Scheutz, **How robots can affect human behavior : Investigating the effects of robotic displays of protest and distress,** *Int. J. of Social Robotics*, vol. 6(3), pp. 343-355, 2014.

© Softbank Robotics

Phytolithes

Des cailloux végétaux

Thomas Hart

Dater la domestication du maïs, montrer qu'*Homo erectus* travaillait le bois, que l'homme de Néandertal mangeait des dattes… : les minuscules concrétions de silice que produisent les plantes sont de précieux indices pour les chercheurs.

Le voyage de Charles Darwin à bord du *Beagle* a profondément marqué l'histoire des sciences. Pourtant, une importante découverte du savant anglais au cours de cette expédition est restée méconnue. Avant de recenser quelques-uns des pinsons qui porteront son nom et qui l'ont inspiré pour développer la théorie de la sélection naturelle, Darwin a été l'un des premiers scientifiques à s'intéresser à de microscopiques concrétions de silice aujourd'hui nommées phytolithes. Le 16 janvier 1832, alors que le *Beagle* faisait escale à Porto Praya, dans les îles du Cap-Vert, au large du Sénégal, il a récolté une fine poussière, filtrée par la voile du bateau, dont il a envoyé des échantillons au naturaliste allemand Christian Ehrenberg, spécialiste en microscopie.

Ce dernier a ainsi observé qu'il s'agissait d'amalgames de silice inorganique issus de tissus de plantes et réalisé leur première classification. Le terme phytolithe, du grec *phyto* (plante) et *lith* (roche), s'est imposé devant les autres, tels la silice opalisée ou l'opale des plantes.

L'ESSENTIEL

- Les phytolithes sont des concrétions de silice produites dans les tissus végétaux.
- À partir de leur forme, il est possible d'identifier dans certains cas l'espèce de la plante d'origine.
- Les phytolithes perdurent longtemps dans le sol, ce qui permet d'en déduire la composition d'un écosystème disparu ou le menu d'espèces éteintes ou non.
- Datation, lutte contre le réchauffement climatique, médecine légale, nanotechnologies, leurs applications potentielles sont multiples.

Les phytolithes sont produits par des familles de plantes représentatives de presque tous les environnements dans le monde, y compris les Angiospermes (plantes à fleurs), les Gymnospermes (conifères, cycadées, ginkgo, gnetales) et les Ptéridophytes (fougères). Comme les phytolithes persistent dans le sol après la décomposition des plantes, on en retrouve de grandes quantités datant de différentes époques.

Le grand avantage de ces concrétions est que leur forme est spécifique des espèces végétales dans lesquelles ils se constituent, ce qui permet d'établir une correspondance entre les plantes et leurs phytolithes. Ainsi, en collectant des phytolithes d'un site donné et d'une époque précise, il est possible de reconstituer un écosystème disparu, de déterminer le régime alimentaire d'espèces animales éteintes ou celui des ancêtres de l'homme. Les applications sont nombreuses et ne se limitent pas à l'étude du passé. On utilise notamment les phytolithes dans les analyses médico-légales, et ils sont même envisagés pour des applications en nanotechnologie.

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

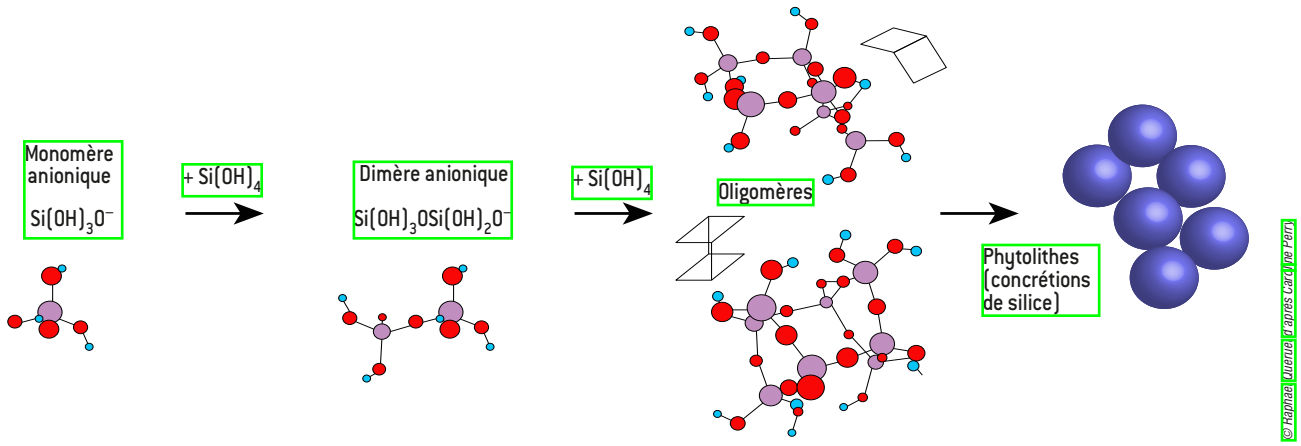
pour révéler le passé



© L. A. E. Strömberg & F. E. Dunn

OBSERVÉS au microscope, les phytolithes, ces concrétions de quelques dizaines de micromètres, présentent une diversité de formes souvent spécifiques des plantes dont ils proviennent.

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017



© Hannah Quenzel (d'après Cardy Yee Hern)

Mais d'où viennent ces « cailloux végétaux » ? Leur formation commence lorsque les racines d'une plante absorbent de l'eau et, avec elle, de l'acide monosilicique $Si(OH)_4$. Au cours de ce processus, nommé transpiration, les plantes acheminent des minéraux et de l'eau du système racinaire à l'ensemble de la plante, déposant l'acide monosilicique en chemin. Certaines plantes présentent même des tissus où l'acide monosilicique s'accumule spécifiquement. L'acide monosilicique constitue alors des corps siliceux *(voir la figure ci-dessus)* qui épousent la forme des tissus alentour, lesquels jouent le rôle de moules microscopiques. C'est pour cette raison que la variété des formes et leur spécificité permettent bien souvent d'associer les phytolithes étudiés à une famille végétale, un genre, une espèce, une sous-espèce voire une partie d'une plante.

Ces concrétions sont composées principalement de dioxyde de silicium (SiO_2), d'eau et de matière organique, avec des traces d'aluminium, de fer, de magnésium, de manganèse, de phosphore, de cuivre et d'azote. La plupart sont légèrement transparentes et leur taille varie de 1 à plus de 100 micromètres.

Quelle utilité pour les plantes ?

De nombreuses plantes produisent des phytolithes, mais il n'est pas clair si ces cailloux ont un rôle particulier. Certains chercheurs ont suggéré qu'ils auraient des fonctions protectrices, structurelles et physiologiques. En effet, les gènes qui contrôlent la production de lignine, une molécule qui apporte de la rigidité aux tissus de la plante et sert aussi de barrière de protection contre des attaques microbiennes, sont aussi ceux qui régulent le développement des phytolithes. Les tissus de plantes avec une forte concentration de phytolithes seraient difficiles à casser ou à digérer, décourageant aussi bien les herbivores que les champignons. Dans les tissus de certaines plantes, comme les feuilles et les tiges de riz, les phytolithes rempliraient aussi une fonction structurelle. Ils assureraient le maintien de la plante, lui garantissant une meilleure exposition au soleil et une photosynthèse plus efficace.

Les phytolithes auraient aussi un rôle important dans la physiologie de la plante parce qu'ils piègent des éléments toxiques pour elle, tels le manganèse et l'aluminium. Cependant, il est difficile de dire avec certitude si la formation des phytolithes a été sélectionnée au fil de l'évolution pour les raisons évoquées ou si elle est le sous-produit d'autres processus encore inconnus.

LA FORMATION des phytolithes débute lorsque les racines des plantes absorbent de l'acide monosilicique $Si(OH)_4$. Durant la transpiration, les plantes perdent de l'eau et la concentration d'acide monosilicique augmente. Ces molécules s'assemblent entre elles pour former des oligomères et finalement des concrétions de silice, les phytolithes.

Une image du passé

Si leur fonction biologique demeure énigmatique, l'intérêt qu'ils présentent pour les chercheurs est quant à lui très clair. Ces concrétions sont de formidables marqueurs du temps. En effet, un des aspects des phytolithes les plus intéressants est leur durabilité après la mort de la plante. Ces concrétions persistent dans l'environnement pendant des dizaines de millions d'années tout en résistant à des températures allant jusqu'à 1 000 °C. Ainsi, les phytolithes trouvés au cours de fouilles archéologiques sont d'importantes sources d'information, surtout lorsqu'ils sont associés à d'autres artefacts. Ils appartiennent à une classe de vestiges nommés écofacts (*biofacts* en anglais), une classe qui comprend aussi des ossements d'animaux, des parasites, des vestiges de plantes séchées, carbonisées ou saturées d'eau, des pollens, des grains d'amidon et des cristaux d'oxalate de calcium (qui composent les calculs rénaux).

L'AUTEUR



Thomas C. HART est chercheur au laboratoire d'archéologie environnementale de l'université du Texas, à Austin.

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

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

Les phytolithes se retrouvent notamment dans les coprolithes (des excréments fossilisés), dans le dépôt de tartre des dents de squelettes et à leur surface, ou sur divers objets. Alors que la matière organique tend à se décomposer et disparaître, les phytolithes restent. Ils sont donc des témoins privilégiés de l'évolution des plantes, des animaux et des hominines (les humains modernes, les espèces humaines éteintes et leurs ancêtres). Récupérés dans des sédiments lacustres, des tourbières, des sols, et des carottes océaniques profondes, ils sont utilisés pour reconstituer la flore du passé à partir de leur forme et en déduire des informations sur le climat associé, ainsi que, éventuellement, sur les pratiques alimentaires des animaux et hominines découverts sur les lieux.

Le pollen sert aussi pour ce type de reconstruction, mais il est souvent disséminé par le vent (en particulier celui des espèces végétales qui dépendent du vent comme pollinisateur) et ne permet qu'une représentation plus régionale de la végétation. Dans la plupart des cas, les phytolithes sont représentatifs de la flore locale parce qu'ils restent liés au sol environnant après la décomposition de la plante. Des exceptions notables existent, comme la situation rencontrée par Darwin : les phytolithes ont atterri sur le *Beagle* parce qu'ils venaient des sols d'Afrique de l'Ouest où ils se sont transformés en aérosols à cause des conditions extrêmement sèches et venteuses.

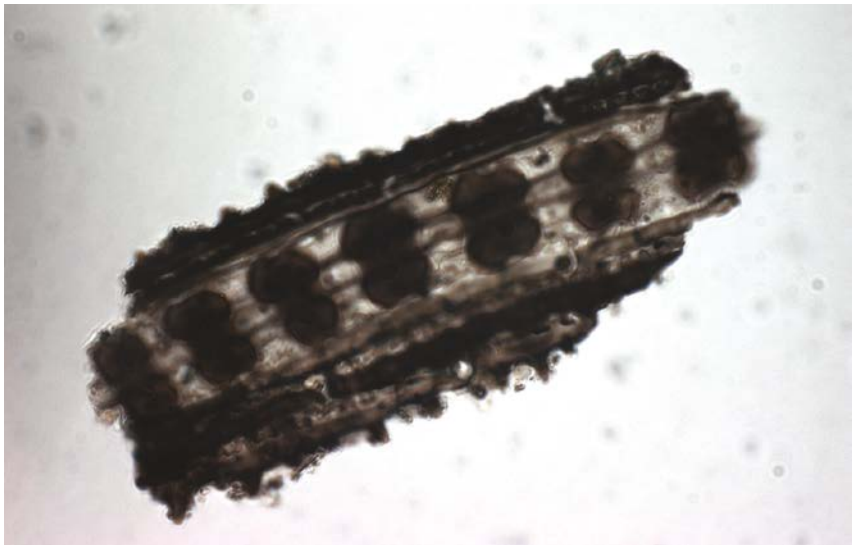
Les paléontologues, paléoanthropologues, archéologues, historiens ont trouvé de nombreuses façons d'utiliser les phytolithes pour reconstituer un écosystème ou un régime alimentaire, mais aussi des choses bien plus étonnantes comme l'organisation d'un groupe de Néandertaliens dans une grotte ou l'époque de la domestication de certaines plantes. Tous ces exemples s'inscrivent sur des périodes très éloignées les unes des autres, parfois très anciennes.

Au cours du Mésozoïque et du Cénozoïque (il y a environ 70 millions d'années), notamment, des écosystèmes dominés par les graminées (de la famille des Poaceae) se sont développés. On sait que des prairies tempérées, des steppes, des savanes tropicales ou subtropicales se sont formées pendant cette période charnière que l'on nomme parfois la « Grande Transformation », mais le moment exact où cette transition a eu lieu a été très débattu à cause de ses implications tant pour l'évolution des plantes que pour celle des animaux. En 2005, Caroline Strömberg, de l'université de Washington, à Seattle, et ses collègues ont analysé les phytolithes retrouvés en Inde, dans des coprolithes de titanosaures datés de la fin du Mésozoïque *(voir la photo ci-dessous)*. Ils ont montré que ces immenses herbivores broutaient une large sélection de plantes comprenant des graminées, des conifères, des cycadales, des dicotylédones ainsi que des palmiers. Cette information suggère que les graminées ont évolué dans des environnements boisés à cette époque, puis se sont répandues et ont constitué de vastes écosystèmes. Grâce à ces résultats, les chercheurs comprennent pourquoi les animaux de cette époque, à l'image des titanosaures, n'avaient pas de dents spécifiques pour broyer des plantes dures. Ces travaux suggèrent aussi que certaines espèces ont coévolué avec l'expansion des graminées, tandis que d'autres ont développé des dentitions plus robustes en réponse à l'apparition de nouveaux écosystèmes.

Dans le cas du singe géant *Gigantopithecus blackii* disparu, les phytolithes retrouvés sur ses dents ont permis de reconstruire son régime alimentaire. Apparenté à l'orang-outan, *G. blackii* vivait au sol et marchait sur ses phalanges. Il y a entre 6 millions et 200 000 ans, il arpentait les forêts du territoire que forment aujourd'hui la Chine et le Vietnam. Le mâle mesurait en moyenne trois mètres pour un poids d'un peu plus de 500 kilogrammes. Les phytolithes fixés aux dents retrouvées indiquent qu'il se nourrissait de graminées, tels des bambous, et de dicotylédones comme le durian ou le jacquier. Cette découverte conduite par Dolores Piperno, de l'institut du Smithsonian, à Washington, en 1990, fut l'une des premières du genre à montrer que les phytolithes sont préservés à la surface des dents. Elle a aussi montré comment les phytolithes peuvent aider à comprendre le lien entre l'évolution des primates et leur régime alimentaire : grâce aux phytolithes découverts, les chercheurs ont pu tester empiriquement des hypothèses sur ces singes disparus, plus précisément sur les causes environnementales de leur alimentation éclectique.

Le régime de l'australopithèque

Les paléoanthropologues appliquent aussi ces méthodes pour étudier le régime alimentaire des ancêtres de l'homme. En 2012, l'équipe d'Amanda Henry, de l'institut Max-Planck d'anthropologie évolutionniste, à Leipzig, en Allemagne, a étudié les phytolithes contenus dans la plaque dentaire d'un ancêtre potentiel du genre *Homo*, l'australopithèque *Australopithecus sediba* (qui a vécu il y a près de 2 millions d'années). Les concrétions de silice indiquent



© J. M. E. Stromberg

LES COPROLITHES, des fèces fossilisées, contiennent des phytolithes *(tel celui-ci où l'on reconnaît la structure des tissus végétaux dans lesquels ils se sont formés)*. L'analyse de ceux des titanosaures, de grands herbivores qui parcouraient la Terre il y a 90 millions à 66 millions d'années, a précisé le régime alimentaire de ces dinosaures.

Les phytolithes

sont utilisés pour reconstituer un écosystème disparu ou déterminer le régime alimentaire d'espèces animales éteintes

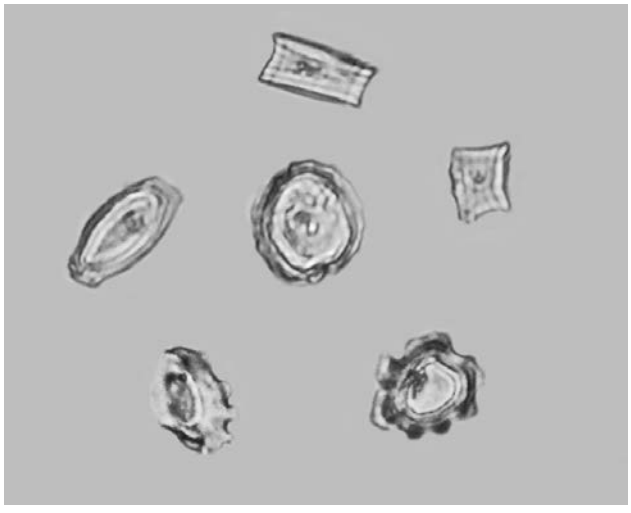
que les individus de cette espèce avaient un régime alimentaire mixte composé de laîche (des plantes aimant les zones ombragées et humides), de graminées, de fruits et de feuilles.

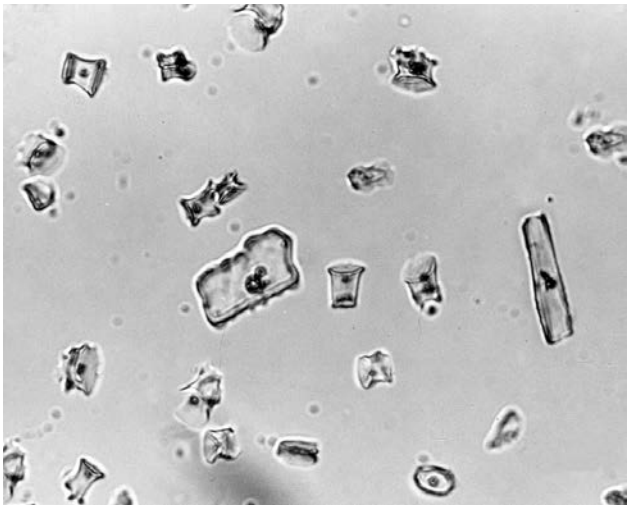
Les phytolithes ont aussi été utilisés pour préciser certaines activités des hominines. À Peninj, en Tanzanie, Manuel Domínguez Rodrigo, de l'université Complutense de Madrid, et ses collègues ont récupéré des phytolithes d'acacia incrustés dans des haches datant de 1,7 million à 1,5 million d'années, indiquant que quiconque avait utilisé cet outil en dernier, probablement *Homo erectus*, travaillait du bois. Les artefacts de bois n'ont pas été préservés, mais il est possible qu'*H. erectus* taillait des outils – une activité pour laquelle nous n'avons pas de preuves directes remontant à cette période, mais seulement à partir de 1 million d'années plus tard.

Le régime alimentaire et les activités des Néandertaliens *(Homo neanderthalensis)* sont un autre domaine dans lequel les phytolithes se sont montrés essentiels. Amanda Henry et Dolores Piperno ont mis en défaut l'idée répandue que les Néandertaliens consommaient surtout de la viande et peu de végétaux. En effet, certains pensaient que ce régime carné, très différent de l'alimentation variée d'*Homo sapiens* aurait pu jouer un rôle dans la disparition des Néandertaliens. Or, avec leurs collègues, les deux chercheuses ont montré que les Néandertaliens se nourrissaient des plantes locales : le tartre dentaire de cette population contenait des phytolithes de plantes comme des dattiers en Irak ou des racines et des tubercules en Belgique.

Ce n'est pas tout. Des phytolithes associés à des espèces ligneuses ont été retrouvés à l'entrée de la grotte de Faraj, en Jordanie, suggérant que ses habitants, des Néandertaliens, utilisaient ces plantes comme paravent il y a entre 69 000 et 49 000 ans. À l'intérieur de la grotte, des phytolithes de dattiers et de cosses de graminées ont été identifiés autour d'un foyer où l'on préparait certainement les plantes pour leur consommation. Les chercheurs ont aussi découvert d'importantes quantités de phytolithes de graminées entre le foyer et le mur du fond : les habitants de la grotte dormaient probablement sur un lit d'herbe.

Plus près de nous, l'analyse des phytolithes a permis de découvrir les origines et l'étendue de certaines cultures vivrières, en particulier dans les zones tropicales et humides où les plantes se conservent très mal. Dolores Piperno et Deborah Pearsall, de l'université du Missouri, ont découvert que la forme des phytolithes dans les feuilles et les épis du maïs domestiqué *(Zea mays)* diffère de celle de ses ancêtres sauvages, les téosintes. Cette découverte, combinée à d'autres preuves (pollens, grains d'amidon), a permis aux scientifiques d'estimer que la domestication





© D. Piperno, Smithsonian

LES MAÏS SAUVAGE ET DOMESTIQUÉ produisent des phytolithes de formes différentes *(à gauche et à droite respectivement)*. Les archéologues utilisent ces spécificités pour identifier les épis et les feuilles retrouvés sur les sites de fouilles. Grâce à cette découverte, on sait que la domestication du maïs remonterait à environ 8 000 à 9 000 ans dans le sud-ouest du Mexique.

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

du maïs a eu lieu il y a entre 8000 et 9000 ans dans la vallée de la rivière Balsas dans le sud-ouest du Mexique. Des techniques de recherche similaires ont été utilisées et le sont encore pour découvrir les centres de domestication du riz *(Oryza sativa)*, du blé *(Triticum aestivum)*, de l'orge *(Hordeum vulgare)* et des bananes *(Musa genus)*.

De façon générale, la recherche archéologique bénéficie elle aussi beaucoup des informations véhiculées par les phytolithes. Alors que j'étais étudiant à l'université du Connecticut, j'ai analysé des phytolithes et des grains d'amidon microscopiques présents dans des sédiments archéologiques et du tartre dentaire de squelettes humains provenant d'un village du nord de la Mésopotamie, à Tell Zeidan, en Syrie. Le site, vieux de 5000 à 8000 ans, se situe à la confluence des fleuves Euphrate et Balikh. Les phytolithes retrouvés parmi les vestiges proviennent de feuilles d'arbres et de plantes de zones humides. Cette découverte a montré pour la première fois que les villageois utilisaient les zones humides proches des fleuves et les forêts comme sources de combustible et de matériaux de construction. Les chercheurs combinent à présent ces données avec celles tirées de restes de bois calciné et de fragments de graines, afin de mieux comprendre le rôle des plantes et de l'agriculture dans le développement d'une des premières sociétés complexes du monde.

Les phytolithes éclairent aussi sur les pratiques au cours de périodes historiques données. Durant ma thèse, j'ai travaillé sur des phytolithes et des grains d'amidon retrouvés dans des sols et sur des tessons de deux sites médiévaux en Angleterre (Glebe Cottage, dans le Northamptonshire, et Durley Cottage, dans le Cambridgeshire). Alors que les registres indiquent que les principales cultures locales étaient l'avoine, l'orge et le seigle, les fermiers et les habitants de ces villages se nourrissaient, d'après les phytolithes, de blé, d'avoine et de légumes. Ce résultat suggère que, comme dans la plupart des sociétés paysannes de par le monde, les productions locales de ces deux sites étaient surtout exportées, les paysans se nourrissant de ce qu'ils parvenaient à cultiver en plus pour eux-mêmes.

En archéologie, les phytolithes aident non seulement à révéler les pratiques, mais aussi à dater les sites fouillés. Habituellement, pour la datation au radiocarbone, les spécialistes utilisent des échantillons de matière organique (bois carbonisé, graines, os) dont le carbone provient du dioxyde de carbone atmosphérique que les plantes ont fixé lors de la photosynthèse, puis éventuellement que des animaux qui mangent ces plantes ont assimilé. Avec un spectromètre de masse, les chercheurs mesurent dans ces échantillons la part d'un isotope radioactif du carbone, le carbone 14, que les rayons cosmiques produisent dans l'atmosphère. Quand la plante meurt, la part de carbone 14 dans ses tissus se met à décroître au fil du temps selon une courbe bien connue. Grâce à la mesure effectuée et à cette courbe, on remonte à la date de la mort de la plante.



© Dupres / perm

CETTE COLLECTION DE PHYTOLITHES prélevés dans les sols de forêts tropicales de montagne au Panama offre une variété de formes qui permet d'identifier les espèces de plantes d'une zone restreinte. On retrouve ici des phytolithes de magnolia *(a)*, de marantacée *(b)*, de palmacées *(c)*. Certains phytolithes sont uniquement classés par le type de plante, comme les plantes ligneuses (arbres, arbustes) *(u)*, d'autres sont produits par de nombreuses espèces *(d, e)* et ne sont donc pas diagnostiqués.

Datation au carbone d'anciens écosystèmes

En général, une simple graine carbonisée ou un bout de bois suffisent. Cependant, les sites archéologiques ou paléoécologiques ne fournissent pas toujours des échantillons appropriés. Certains chercheurs ont donc proposé d'utiliser le carbone biologique souvent piégé dans les phytolithes.

La silice des phytolithes protège la matière organique de la fossilisation et de l'altération atmosphérique, mais aussi des réactions chimiques parfois nécessaires pour l'analyse par spectrométrie de masse. De plus, le fait d'avoir des milliers de phytolithes dans un unique échantillon de sol permet de nombreuses mesures, ce qui assure une meilleure évaluation des incertitudes sur une date. L'utilisation du carbone des phytolithes offre donc des perspectives intéressantes. Néanmoins, en 2010, Guaciara Santos, de l'université de Californie à Irvine, Anne Alexandre, du Cerege (Centre européen de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement), à l'université Aix-Marseille, et leurs collègues ont montré que les phytolithes de plantes actuelles contenaient du carbone plus ancien que prévu. Celui-ci pourrait être absorbé par les racines au lieu d'être d'origine atmosphérique.

Malgré ces observations, une grande part de la communauté pense qu'il est possible d'exploiter le carbone des phytolithes. Dès lors, d'autres utilisations encore sont envisagées. La forme des phytolithes indique assez bien le type de plante dont ils sont issus, mais la mesure du ratio des isotopes de carbone 12 et de carbone 13 de la matière organique piégée dans la concrétion révèle d'autres indices sur cette plante. En effet, la photosynthèse privilégie les molécules de dioxyde de carbone contenant du carbone 12 plutôt que du carbone 13. Cependant, les plantes

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

n'utilisent pas toutes la même chaîne métabolique pour fixer le carbone. Certaines fixent un peu plus de carbone 13 que d'autres. Nommées plantes C4 (car un composant du cycle métabolique possède quatre atomes de carbone), ces plantes sont résistantes à la sécheresse, apprécient une forte exposition à la lumière et constituent environ la moitié des herbes dans le monde. Les autres plantes (nommées plantes C3) – comme la plupart des arbres, les arbustes et les herbes domestiquées – apprécient un ensoleillement et des températures modérés, une humidité abondante, et tolèrent une concentration de carbone 13 beaucoup plus faible dans leurs tissus.

Les archéologues et les paléoécologues pourraient utiliser cette information pour reconstituer les schémas généraux de végétation d'une région ou les conditions environnementales dans lesquelles les plantes ont poussé. Certains s'intéressent aussi à l'oxygène, l'azote, et les isotopes d'aluminium contenus dans les phytolithes, potentiellement exploitables de la même façon que le carbone, mais plus d'études sont nécessaires afin de tester la faisabilité de ces analyses.

Jusqu'à présent, la plupart des recherches utilisant des phytolithes se sont focalisées sur l'étude du passé. Mais les caractéristiques qui rendent ces structures si précieuses dans ce domaine, comme leur durabilité et leur spécificité taxonomique, sont aussi fort utiles dans des situations modernes.

Une étude récente menée par Amanda Henry montre l'intérêt des phytolithes et des grains d'amidon dans l'étude du régime alimentaire des primates actuels. Les méthodes usuelles ne suffisent pas toujours : l'observation est parfois délicate si les animaux se sauvent et mangent leur nourriture hors de vue, et l'examen fécal résulte souvent en un registre incomplet. Les phytolithes – contenus dans les selles, les échantillons de sol, ou collectés sur les outils des primates comme les pierres à noix, ainsi que sur la plaque dentaire – fournissent l'information manquante. L'utilisation des concrétions de silice débute seulement en

Des oasis à Olduvai il y a plus de un million d'années

Depuis la découverte d'un homininé par Louis et Mary Leakey en 1959, la gorge d'Olduvai est le lieu d'intenses recherches. Les fossiles d'animaux (ossements, dents) et artefacts humains (outils taillés, os entaillés) abondent dans ce paléobassin sédimentaire.

La gorge d'Olduvai est située dans la plaine du Serengeti dans le nord de la Tanzanie. Dans cette région aride, l'évaporation est très supérieure aux précipitations, ce qui rend salée l'eau des lacs, impropre à la consommation de la plupart des animaux, hommes et singes inclus.

Comment, dans ces conditions, expliquer la présence récurrente à cet endroit pendant plus de un million d'années de trois espèces différentes d'hominiinés (*Paranthropus boisei, Homo habilis* et probablement *Homo erectus*), de plusieurs industries lithiques et de nombreuses carcasses d'animaux portant des traces de découpe attestant une activité humaine ?

En 2014, j'ai analysé des phytolithes préservés dans les paléosols de plusieurs sites archéologiques de la gorge d'Olduvai. Pour réaliser une telle étude, il faut considérer des assemblages de plusieurs milliers de phytolithes récoltés dans les paléosols et les sédiments. Ceux-ci sont ensuite comparés aux phytolithes de plantes connues, issues de spécimens d'herbiers, afin de reconstruire la végétation passée. On caractérise aussi des assemblages de phytolithes actuels qui serviront de référence. À ce jour, plus de 500 sites en Afrique ont ainsi été caractérisés.

Grâce aux phytolithes, j'ai montré qu'entre 1,9 million et 1,5 million d'années avant notre ère, à deux reprises, la végétation a été de type marécageux riche en espèces hydrophiles (roseaux, laîches) à proximité de résurgences d'eau souterraine formant des oasis, s'enrichissant en espèces ligneuses, palmiers et graminées à mesure que l'on s'éloignait du point d'eau douce et se rapprochait du lac salé. D'après d'autres marqueurs tels les pollens et les isotopes du carbone, ce phénomène a pu se produire jusqu'à cinq fois sur cette période.

Sur les affleurements géologiques à Olduvai, on retrouve des indices de ces résurgences d'eau douce souterraine : certaines roches calcaires incrustées dans les dépôts sédimentaires – des travertins – sont caractéristiques de la présence de sources d'eau. Leur position, dans les zones de piémont, suggère que les oasis ont ponctué le paysage durant des périodes climatiques sèches, quand le niveau du lac était bas. Des marécages, voire des forêts, se sont alors développés. Lorsque le niveau du lac était plus haut, il inondait le piémont et l'eau était salée.

Aujourd'hui, suite au basculement du bassin d'Olduvai vers l'est, conséquence de l'ouverture du rift, l'eau s'écoule vers le sud. On observe ainsi des sources d'eau douce 30 kilomètres plus au sud, marquées par des îlots verts et boisés qui contrastent avec un paysage riche en baobabs, acacias, euphorbes candélabres et autres espèces végétales typiques de cette région aride. Ces nouvelles oasis fournissent notamment de l'eau aux chasseurs-cueilleurs Hadzabe qui vivent dans les monts Mbulu.

Dans ce berceau de l'humanité qu'est la gorge d'Olduvai, les phytolithes ont permis d'expliquer la présence importante d'ossements et d'outils de pierre taillée. Ces oasis étaient un élément du paysage attractif en termes de ressource en eau potable, en plantes comestibles (palmiers, tubercules) et en proies animales potentielles, elles aussi attirées par l'eau douce. Ces oasis, en conséquence, devaient être des zones d'intense compétition entre proies (herbivores, hominiinés…) et prédateurs (carnivores… et hominiinés !). Les phytolithes ont donc apporté un complément d'information sur la paléovégétation et son hétérogénéité spatiale qui n'était pas accessible à partir des données extraites des pollens, lesquels fournissent des informations sur la végétation à l'échelle plus vaste du paysage.

La répartition des sources d'eau douce dans le paléopaysage et leur disponibilité dans le temps est un facteur environnemental qui a probablement influé sur le moment et l'étendue des migrations et de la dispersion des hominiinés dans le rift est-africain.

– Doris Barboni
Cerege, CNRS, Aix-en-Provence

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

primatologie, mais elle pourrait être étendue à l'étude d'autres populations animales.

Par ailleurs, du fait de certaines propriétés physiques, les phytolithes commencent à intéresser le secteur des nanotechnologies. En 2009, Suresh Neethirajan, de l'université de Guelph, au Canada, et ses collègues ont montré que les phytolithes produits dans les feuilles de l'agrostide rampante *(Agrostis palustris)* réduisent la chaleur absorbée par la plante et accélèrent son refroidissement. En effet, les phytolithes réémettent de façon efficace un rayonnement infrarouge. Ces observations soulignent leur potentiel d'utilisation dans divers systèmes nanométriques qui nécessitent, par exemple, un bon contrôle de la température. Autre avantage : les sources naturelles de phytolithes sont nombreuses et peu chères pour les industriels qui pourraient les récupérer dans les déchets végétaux (tiges, feuilles de certaines plantes) non exploités. Des dispositifs artificiels reproduisant le procédé de formation naturel des phytolithes sont aussi à l'étude.

Des pesticides au transport de médicament

Les autres applications possibles des phytolithes en nanotechnologie sont variées. Des pesticides sont produits à partir de la silice amorphe issue de phytolithes fondus. Appliquée sur des insectes nuisibles, cette silice perturbe la capacité des lipides de leur cuticule à retenir l'eau, ce qui entraîne la dessiccation et la mort des insectes. Fondus en nanoéléments de base, les phytolithes sont aussi assemblés pour former des nanocomposites. La morphologie des phytolithes fondus les rend par ailleurs bien adaptés pour transporter des composés organiques et encapsuler des enzymes, en vue de leur libération dans l'organisme au cours d'un traitement médical.

À l'opposé, certains envisagent une utilisation des phytolithes en géo-ingénierie : des chercheurs en Australie et en Chine examinent la possibilité d'utiliser les phytolithes comme piège à carbone afin d'aider à réduire les concentrations globales de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Lorsque les phytolithes se forment et piègent le carbone, ils le retirent de l'atmosphère. Ce carbone est alors stocké dans le sol lors de la décomposition de la plante. L'une des hypothèses les plus communes concernant la séquestration du carbone *via* l'agriculture est que les plantes libèrent plus de carbone dans l'atmosphère lorsqu'elles se décomposent que ce qui est piégé dans les phytolithes. Par conséquent, les cultures en décomposition ne seraient pas un outil efficace de lutte contre le changement climatique. Mais Xinxin Zuo et Houyuan Lu, de l'Académie des sciences chinoise, ont testé les capacités de piégeage du millet commun *(Panicum miliaceum)* et du millet des oiseaux *(Setaria italica)* en milieu agricole sec et ont montré que cela n'est pas vrai. D'après leurs calculs, le millet commun comme celui des oiseaux peuvent séquestrer environ 0,020 tonnes de carbone par hectare. Ils estiment que, compte tenu de la superficie de millet commun cultivé aujourd'hui en Chine, cette céréale supprimerait plus de dioxyde de carbone de l'atmosphère qu'elle n'en a relâché, à raison de 2 370 000 tonnes de dioxyde de carbone par an.

Séquestration de carbone

Jeff Parr et ses collègues en Australie ont quant à eux examiné la bioséquestration du carbone dans des espèces de bambou. Ils avancent que 15 600 000 tonnes de dioxyde de carbone seraient séquestrées dans le sol si le bambou était exclusivement cultivé sur les 22 millions d'hectares de forêt de bambou actuelle. En extrapolant ces données, Jeff Parr montre que l'augmentation actuelle des émissions globales de dioxyde de carbone serait réduite d'environ 11 % si le bambou, ou une autre plante à taux élevé de séquestration de carbone, était cultivé sur la totalité des 4,1 milliards d'hectares de terre arable dans le monde.

Il est clair que les phytolithes inspirent beaucoup les chercheurs et que de nombreuses pistes d'utilisation sont encore à explorer. Charles Darwin, lorsqu'il récupéra cette fine poussière à bord du *Beagle*, ne pouvait imaginer que ces minuscules bouts de silice seraient aussi riches d'information sur le passé et le présent, ou d'un fort potentiel pour les technologies futures et dans la lutte contre le réchauffement de la planète. Et ces roches végétales translucides ont encore beaucoup de choses à nous dire sur leur histoire – et sur la nôtre. ■

Phytolithes et police scientifique

Dans une affaire de meurtre à Spokane, aux États-Unis, les enquêteurs ont utilisé les phytolithes pour prouver qu'un suspect était bien sur le lieu du crime.

Les phytolithes retrouvés sur sa camionnette n'étaient pas de la même forme que ceux du site où le suspect affirmait être au moment des faits.

En revanche, ils correspondaient à ceux produits par les plantes où le corps de la victime a été retrouvé. Cette preuve fut l'un des éléments qui aidèrent les enquêteurs à comprendre ce qui s'était passé et à faire condamner le suspect.

BIBLIOGRAPHIE

A. G. Henry *et al.*, **The diet of *Australopithecus sediba***, *Nature*, vol. 487, pp. 90-93, 2012.

G. M. Santos *et al.*, **The phytolith ^{14}C puzzle : A tale of background determinations and accuracy tests**, *Radiocarbon*, vol. 52(1), pp. 113-128, 2010.

D. R. Piperno, **Phytoliths : A Comprehensive Guide for Archaeologists and Paleoecologists**, AltaMira Press, 2006.

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

Les extraterrestres de Churchill

Mario Livio

Sommes-nous seuls dans l'Univers ? La question a passionné Winston Churchill. Ses réflexions sur le sujet, récemment retrouvées, montrent que l'homme d'État britannique avait une solide culture scientifique et un raisonnement pertinent.

Winston Churchill est essentiellement connu comme chef de guerre, homme politique parmi les plus influents du XXe siècle, historien lucide et orateur éloquent. C'était aussi un passionné de science et de technologie.

En 1896, à l'âge de 22 ans, alors qu'il était posté en Inde avec l'Armée britannique, Churchill lut l'ouvrage *De l'origine des espèces* de Darwin et un manuel d'introduction à la physique. Dans les années 1920 et 1930, il écrivit pour divers journaux et revues des essais de vulgarisation scientifique sur des sujets tels que l'évolution ou les cellules.

Dans un article datant de 1931, publié par *The Strand Magazine* et intitulé « Dans cinquante ans » *(Fifty years hence)*, il décrit l'énergie de fusion nucléaire : « Si l'on parvenait à faire que les atomes d'hydrogène d'une livre d'eau se combinent pour former de l'hélium, l'énergie produite suffirait à alimenter un moteur de mille chevaux pendant une année entière. » Ces écrits tiraient probablement leurs informations de conversations avec un ami qui sera ensuite l'un de ses conseillers, le physicien Frederick Lindemann.

Durant la Seconde Guerre mondiale, Churchill a soutenu le développement du radar et le programme nucléaire britannique. Il rencontrait régulièrement des scientifiques tels que Bernard Lovell, le père de la radioastronomie. Un échange concernant l'utilisation des statistiques pour combattre les sous-marins allemands illustre bien son attitude : quand le général de l'armée de l'air Arthur « Bomber » Harris se plaignit : « Est-ce que nous livrons cette guerre avec des armes ou avec des règles à calcul ? », Churchill répondit : « Essayons la règle à calcul. »

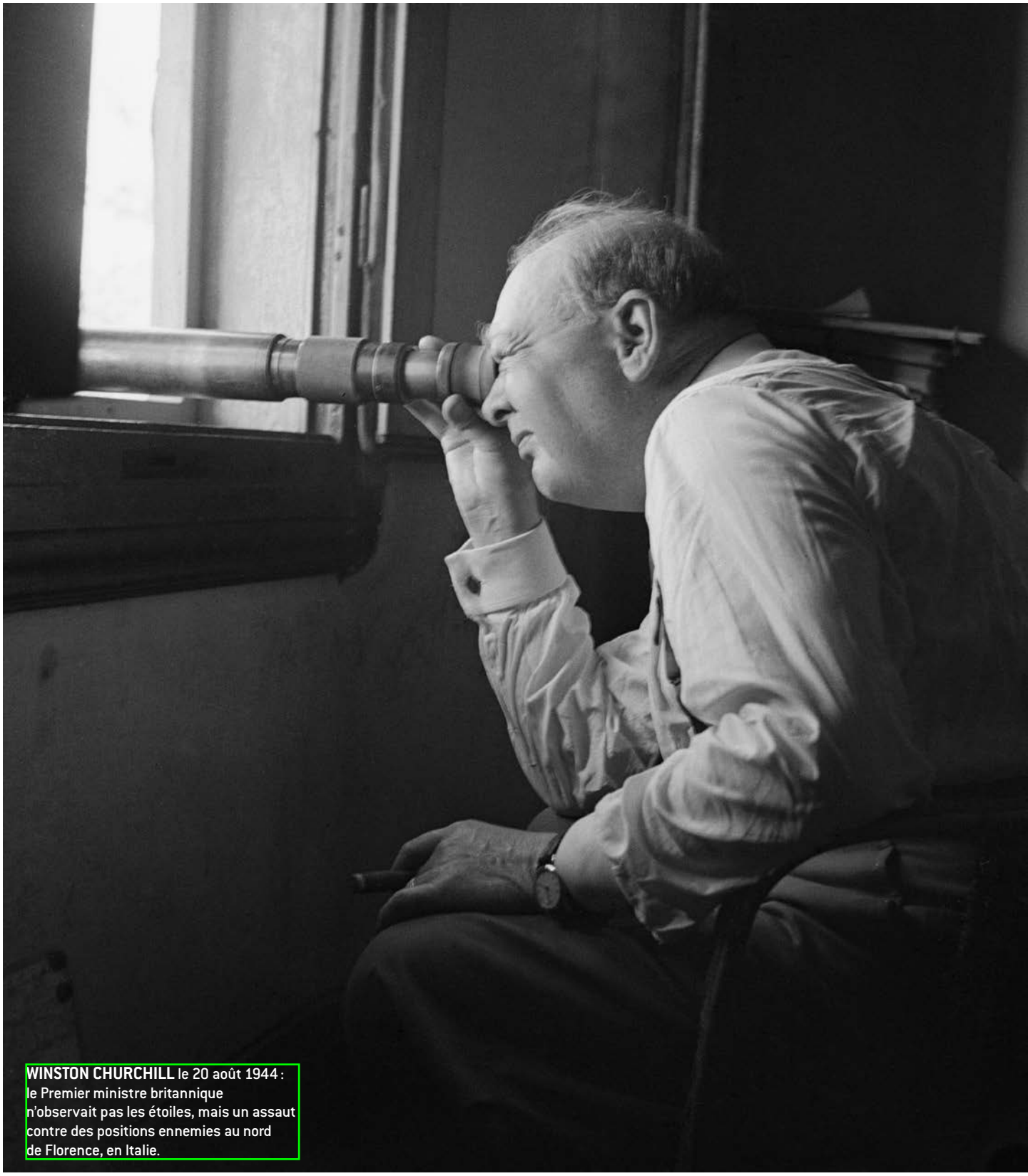
En recrutant Lindemann au début des années 1940, Churchill fut le premier chef du gouvernement à employer un conseiller scientifique. L'environnement propice à la science qu'il créa grâce au financement public de laboratoires, de télescopes et développements technologiques s'est traduit par un après-guerre riche en découvertes et inventions dans des domaines allant de la génétique moléculaire à la radiocristallographie.

Malgré tout cela, ce fut une grande surprise quand, au cours d'une visite l'année dernière au musée américain Churchill de Fulton, dans le Missouri, le directeur Timothy Riley me mit entre les mains un essai dactylographié de Churchill. Dans cet article de 11 pages intitulé « Sommes-nous

L'ESSENTIEL

- Un texte de Winston Churchill écrit en 1939 a été redécouvert dans les archives du musée américain Churchill, dans le Missouri.
- Churchill livre dans cet article de 11 pages ses réflexions quant à la question « Sommes-nous seuls dans l'Univers ? ».
- Les arguments avancés par Churchill sont scientifiquement informés et sensés.
- L'exemple de Churchill, conscient de l'importance de la science, devrait inspirer nombre de personnalités politiques.

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017



WINSTON CHURCHILL le 20 août 1944 : le Premier ministre britannique n'observait pas les étoiles, mais un assaut contre des positions ennemies au nord de Florence, en Italie.

© www.getty images/ Contributeur

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017



© NASA/JPL-Caltech/Univ. of Ariz.

LA PLANÈTE MARS a sans doute eu de l'eau liquide à sa surface dans le passé. C'est l'une des conditions du développement de la vie, ce que savait très bien Churchill. Ce cliché a été pris par la sonde *Mars Reconnaissance Orbiter* en 2015.

seuls dans l'Univers ? », l'homme politique livrait ses réflexions prémonitoires sur la recherche de vie extraterrestre.

Il en rédigea le premier jet, peut-être pour l'édition dominicale du journal londonien *News of the World*, en 1939, alors que l'Europe était au seuil de la guerre. Il le révisa légèrement à la fin des années 1950, alors qu'il était en villégiature dans le sud de la France chez son éditeur, Emery Reves. Par exemple, il modifia le titre original « Sommes-nous seuls dans l'Espace ? » en « Sommes-nous seuls dans l'Univers ? » pour tenir compte des évolutions des connaissances et de la terminologie scientifiques. Wendy Reves, l'épouse de l'éditeur, confiera le manuscrit aux archives du musée américain Churchill dans les années 1980.

Timothy Riley, qui a été nommé directeur du musée en mai 2016, venait de le redécouvrir. À sa connaissance, l'essai est resté dans la collection privée de Reves et n'a jamais été publié ni examiné par des scientifiques ou universitaires. Imaginez alors mon excitation d'être peut-être le premier scientifique à me pencher sur cet essai !

Je retrace ici les grandes lignes de la réflexion de Churchill. À une époque où beaucoup de politiciens se détournent de la science, il est très émouvant pour moi d'évoquer un dirigeant qui s'y est intéressé si profondément.

Une pensée moderne

On retrouve dans le raisonnement de Churchill de nombreux arguments modernes de l'astrobiologie. Pour l'essentiel, il embrasse le cadre du « principe copernicien » : l'idée selon laquelle, étant donné l'étendue de l'Univers, il est difficile de croire que les humains sur Terre représentent quelque chose d'unique. Il commence par définir ce qui est selon lui la caractéristique la plus importante de la vie, à savoir la capacité à « croître et se multiplier ». Après avoir noté que certains virus peuvent être cristallisés, ce qui les rend difficile à catégoriser, il décide de se concentrer sur la « vie relativement organisée », sans doute la vie multicellulaire.

Son premier argument est que « toutes les entités vivantes que nous connaissons ont besoin d'eau ». Les corps et les cellules en sont composés pour une grande part, note-t-il. Il n'est pas possible d'exclure d'autres liquides, mais « rien dans nos

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

connaissances actuelles ne nous permet de faire une telle hypothèse ». La présence d'eau sous forme liquide oriente d'ailleurs toujours notre quête de vie extraterrestre, que ce soit sur Mars, sur les lunes de Saturne et de Jupiter ou sur les planètes extrasolaires (au-delà de notre Système solaire). Outre le fait d'être essentielle pour l'émergence de la vie sur Terre, l'eau est abondante dans le cosmos. Ce solvant merveilleusement universel (presque toutes les substances peuvent s'y dissoudre) peut acheminer des substances chimiques, telles que des phosphates, de l'extérieur vers l'intérieur des cellules, ou inversement.

Churchill définit ensuite ce qu'on appelle aujourd'hui la zone habitable, cette étroite région du juste milieu autour d'une étoile qui n'est ni trop chaude ni trop froide, de sorte que l'eau puisse rester à l'état liquide à la surface d'une planète rocheuse. Il écrit que la vie ne peut survivre que dans des régions « entre quelques degrés en dessous de zéro et le point d'ébullition de l'eau ». Il explique comment la température de la Terre est déterminée par sa distance au Soleil. Churchill considère également la capacité d'une planète à retenir son atmosphère, expliquant que plus un gaz est chaud, plus ses molécules se déplacent vite et donc plus elles s'échappent facilement. Par conséquent, une gravité plus forte est nécessaire pour piéger le gaz autour d'une planète sur le long terme.

En réunissant tous ces éléments, il conclut que, hormis la Terre, Mars et Vénus sont les seuls endroits du Système solaire susceptibles d'abriter la vie. Il élimine les planètes externes (trop froides), Mercure (trop brûlant du côté ensoleillé et trop froid de l'autre), ainsi que la Lune et les astéroïdes (leur gravité est trop faible pour retenir une atmosphère).

Churchill coucha sur le papier les premiers mots de son essai peu de temps après la radiodiffusion, en 1938 aux États-Unis, de *La Guerre des mondes* (une adaptation du roman de H. G. Wells paru en 1898), qui a déclenché une « fièvre de Mars » dans les médias.

La spéculation sur l'existence de la vie sur la planète rouge allait en fait bon train depuis la fin du XIX^{e} siècle. En 1877, l'astronome italien Giovanni Schiaparelli rapportait avoir observé des marques linéaires sur Mars (*canali*, traduit à tort en « canaux »), que l'on considérait comme une œuvre d'une civilisation. Il s'avéra qu'il ne s'agissait que d'illusions d'optique, mais l'idée des Martiens est restée. Les récits de science-fiction ont proliféré, culminant avec les *Chroniques martiennes* de Ray Bradbury (Doubleday, 1950), publiées au Royaume-Uni sous le titre *The Silver Locusts*, les « Sauterelles d'argent » (Rupert Hart-Davis, 1951).

L'AUTEUR



Mario LIVIO est astrophysicien aux États-Unis et écrivain. Son prochain livre, intitulé *WHY ? What Makes Us Curious*, paraîtra en été 2017.

Perspective cosmique

L'essai de Churchill évalue ensuite la probabilité que d'autres étoiles abritent des planètes. Selon son raisonnement, « le Soleil n'est qu'une étoile parmi les milliards d'autres que contient notre galaxie ». Churchill suppose que les planètes sont formées à partir du gaz qui est arraché à l'étoile quand une autre étoile passe à proximité, un modèle suggéré par l'astrophysicien James Jeans en 1917, et qui a depuis été écarté. Il en déduit que, ces rencontres étant rares, « notre soleil pourrait bien être exceptionnel, voire unique ».

Et c'est là que Churchill brille par sa clairvoyance. Avec le scepticisme salutaire d'un scientifique, il écrit : « Mais cette spéculation dépend de l'hypothèse selon laquelle les planètes se sont formées ainsi. Ce n'est peut-être pas le cas. Nous savons qu'il existe des millions d'étoiles doubles, et si elles ont pu se former, pourquoi pas des systèmes planétaires ? »

Et en effet, la théorie actuelle de formation des planètes (la formation progressive du noyau des planètes rocheuses par accrétion de nombreux corps de petite taille) est très différente de celle de Jeans. Churchill écrit : « Je ne suis pas assez vaniteux pour m'imaginer que mon soleil soit le seul à avoir une famille de planètes ».

« Je ne suis pas assez vaniteux pour m'imaginer que mon soleil soit le seul à avoir une famille de planètes »

Ainsi, conclut-il, une grande part des planètes extrasolaires « seront de la bonne taille pour garder de l'eau en surface, et éventuellement une atmosphère d'un genre ou d'un autre », et certaines seront « à la bonne distance de leur étoile mère pour maintenir une température convenable ».

Ces mots ont été écrits des décennies avant la découverte de milliers de planètes

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

extrasolaires, à partir des années 1990, et des années avant que l'astronome Frank Drake ne présente son argument probabiliste concernant la rareté des civilisations capables de communiquer dans le cosmos, en 1961. L'extrapolation de données de l'observatoire spatial *Kepler* suggère que la Voie lactée contient probablement plus d'un milliard de planètes de la taille de la Terre dans les zones habitables d'étoiles de la taille du Soleil, ou plus petites.

Conscient des distances

Enfin, après quelques considérations sur les immenses distances en jeu, Churchill conclut que nous ne saurons peut-être jamais si ces planètes « hébergent des créatures vivantes, ou même des plantes ».

Churchill voit une opportunité immense pour l'exploration du Système solaire. « Un jour, peut-être même dans un avenir pas si lointain, il pourrait être envisageable de voyager jusqu'à la Lune, voire Vénus ou Mars », écrit-il. En revanche, note-t-il, le voyage et la communication interstellaires sont intrinsèquement difficiles. Il fait valoir que la lumière elle-même mettrait environ cinq ans pour effectuer un aller-retour jusqu'à l'étoile la plus proche, ajoutant que la galaxie spirale la plus proche de la Voie lactée (Andromède, l'une des « nébuleuses spirales » comme il les appelle) est plusieurs centaines de milliers de fois plus distante que les étoiles les plus proches.

L'essai se conclut avec enthousiasme : « avec des centaines de milliers de nébuleuses, contenant chacune des milliers de millions de soleils, la probabilité est énorme qu'il y ait un nombre immense de planètes dont les circonstances ne rendraient pas la vie impossible. » Churchill montre ici qu'il est familier des recherches de l'astronome Edwin Hubble à la fin des années 1920 et au début des années 1930, qui a découvert qu'il y a de nombreuses galaxies au-delà de la Voie lactée (environ 2 000 milliards selon une estimation récente).

Mais sur une note plus sombre qui est le reflet de son époque, Churchill ajoute : « En ce qui me concerne en tout cas, je ne suis pas impressionné par les succès de notre civilisation au point d'être prêt à penser que nous sommes le seul endroit de ce vaste univers qui contienne des créatures vivantes et pensantes, ni que nous représentions le plus haut degré de développement mental et physique à être jamais apparu dans l'immensité de l'espace et du temps. »

Près de quatre-vingts ans plus tard, la question qui obsédait Churchill est l'un des sujets de recherche les plus brûlants. La recherche de signes d'une vie souterraine sur Mars est en cours. Les simulations du climat de Vénus suggèrent qu'il n'est pas complètement impossible qu'elle ait été autrefois habitable. Les astronomes pensent que, dans quelques décennies, nous découvrirons des signatures biologiques de la vie passée ou présente dans les atmosphères de planètes extrasolaires, ou au moins que nous serons en mesure de donner des limites sur sa rareté.

L'essai de Churchill témoigne de sa vision selon laquelle les fruits de la science et de la technologie sont essentiels au développement de la société. Quand il contribua à la fondation du Churchill College à l'université de Cambridge, au Royaume-Uni, en 1958, il écrivit : « C'est seulement en menant l'humanité à la découverte de nouveaux champs de la science et de l'ingénierie que nous maintiendrons notre position et que nous continuerons à gagner notre vie. »

Une vision humaniste de la science

Mais il craignait également que sans la compréhension des humanités, les scientifiques n'opèrent dans un vide moral. « Nous avons besoin de scientifiques dans le monde, mais pas d'un monde de scientifiques », déclara-t-il. Afin que la science soit là « pour servir l'homme et non pour le gouverner », il pensait qu'il faut mettre en place des mesures politiques appropriées, inspirées par les valeurs humanistes. Comme il le dit dans un discours prononcé en 1949 à une assemblée de l'Institut de technologie du Massachusetts : « Si, avec toutes les ressources de la science moderne, nous nous trouvons incapables d'éviter une famine mondiale, nous serons tous responsables. »

Churchill était un fervent partisan de la science, mais il plaçait aussi les questions scientifiques importantes dans le contexte des valeurs humaines. Plus que jamais dans le paysage politique d'aujourd'hui, les dirigeants élus devraient s'inspirer de l'exemple de Churchill : nommer des conseillers scientifiques permanents, et en faire bon usage. ■

Cet article a été publié initialement par *Nature* le 16 février 2017 sous le titre *Winston Churchill's essay on alien life found* (http://go.nature.com/2IkoXID). La traduction et son édition a été réalisée par *Pour la Science*.

BIBLIOGRAPHIE

M. Livio et J. Silk, **Where are they ?**, *Physics Today*, à paraître.

C. Conselice *et al.*, **The evolution of galaxy number density at z < 8 and its implications**, *Astrophys. J.*, vol. 830, p. 83, 2016.

R. V. Jones, dans **Churchill** (éd. R. Blake et W. R. Louis), p. 437, Clarendon Press, 1996.

J. C. Humes, **Churchill : The Prophetic Statesman**, p. 82, Regnery History, 2012.

W. Churchill, **Churchill College**, *The New Scientist*, 15 mai 1958.

W. Churchill, **Fifty years hence**, *The Strand Magazine*, décembre 1931.

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017



Abonnez-vous à POUR LA SCIENCE

Plus de **24%** de réduction

OFFRE DÉCOUVERTE

12 nos par an

4,90€ PAR MOIS

SEULEMENT

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à : Pour la Science - Service abonnements - 19 rue de l'industrie - BP 90 053 - 67 402 Illkirch cedex

PAS474

❑ **OUI**, je m'abonne à *Pour la Science* **formule Découverte.**
Je règle par prélèvement automatique de 4,90€ par mois et je complète l'autorisation ci-contre. **J'économise 24% par mois.**
(DPV4E90)

MES COORDONNÉES

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

_____

Code postal _____

Ville : _____

Tél. Pour le suivi client (facultatif) : _____

E-mail obligatoire : _____

@ _____

J'accepte de recevoir les informations de *Pour la Science* ❑ OUI ❑ NON
et de ses partenaires ❑ OUI ❑ NON

Délai de livraison: dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31/07/2017 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site www.pourlascience.fr. Conformément à la loi "Informatique et libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à *Pour la Science*. Votre abonnement en prélèvement est reconduit automatiquement et peut être interrompu par simple lettre.

MANDAT DE PRÉLÈVEMENT SEPA En signant ce mandat SEPA, j'autorise Pour la Science à transmettre des instructions à ma banque pour le prélèvement de mon abonnement dès réception de mon bulletin. Je bénéficie d'un droit de rétractation dans la limite de 8 semaines suivant le premier prélèvement. Plus d'informations auprès de mon établissement bancaire.

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque) _____

IBAN _____
(Numéro d'identification international du compte bancaire)

Établissement teneur du compte

Nom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville _____

Date et signature

Organisme Créancier
Pour la Science - 8 rue Férou - 75006 Paris
N° ICS FR92ZZZ426900
N° de référence unique de mandat (RUM)

Joindre un RIB

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

LOGIQUE & CALCUL

Big Brother à nos portes (dérobées)

Parfois totalement indétectables, les portes dérobées informatiques nuisent gravement à la sécurité. Introduites à des fins d'espionnage ou de malveillance, ces « backdoors » exposent aussi chacun de nous au risque d'intrusion dans sa vie privée.

Jean-Paul DELAHAYE

Je ne veux pas vivre dans un monde où tout ce que je dis, tout ce que je fais, chaque personne à qui je parle, chaque expression de créativité, d'amour ou d'amitié, est enregistré.
Edward Snowden

En informatique et particulièrement dans tout ce qui est lié à la sécurité des systèmes, le terme de *backdoor* (signifiant « porte dérobée » ou « entrée cachée ») désigne un point d'accès secret. Celui-ci, ménagé dans un dispositif informatique, un programme, une machine, un réseau, permet d'en prendre le contrôle, d'en fausser l'usage ou au moins d'être informé de ce qui s'y passe, à l'insu de ceux qui s'en servent.

En cryptographie, ces portes dérobées donnent le pouvoir à celui qui en connaît l'existence de lire les messages chiffrés par un algorithme dont les utilisateurs pensent, de manière illusoire, qu'ils sont impossibles à percer. On a parfois envisagé d'installer des portes dérobées dont la présence serait connue de tous, mais dont l'accès serait réservé aux autorités.

Dans le cas d'un serveur reliant des machines ou constituant les nœuds principaux dans un réseau informatique, il s'agira de procédures permettant de contrôler les machines. Il s'agira aussi de dispositifs matériels mis en place dès la conception des machines, ou à l'insu de leurs fabricants après la sortie d'usine, et qui dupliquent toutes les informations qui y passent et en envoient la copie à un destinataire complice, sans que le vendeur du matériel ou ses acheteurs ne le sachent.

Parfois, une porte dérobée est une fonction utilisée normalement lors de la mise au point des dispositifs logiciels ou matériels qui permet de les observer afin de comprendre ce qui s'y passe et corriger des erreurs éventuelles ; mais il arrive qu'on oublie de la supprimer ou de la désactiver avant la commercialisation, donnant ainsi la possibilité aux concepteurs des programmes d'y accéder subrepticement. La plus fameuse histoire de ce type concerne le poker en ligne.

Poker en ligne frauduleux

Cette porte dérobée fit gagner des millions de dollars à une équipe de tricheurs qui ne fut jamais parfaitement identifiée. Le principe de la tricherie était élémentaire : les développeurs d'un logiciel de jeu de poker en ligne avaient prévu une combinaison de touches qui leur donnait accès aux cartes cachées des adversaires, y compris quand ils n'étaient liés au système que comme simples joueurs et non comme administrateurs. Une fois le logiciel vendu et installé sur une plateforme qui n'était pas informée du trucage, ils s'inscrivaient comme simples clients et, lorsque les enjeux leur semblaient en valoir la peine, ils activaient la fonction qui leur montrait toutes les cartes, ce qui augmentait considérablement leurs chances de gagner !

L'escroquerie a duré des années, aux dépens d'une multitude de clients américains des sites *Ultimate bet* et *Absolute Poker* qui utilisaient, sans le savoir, le programme truqué. Russ Hamilton et plusieurs de ses complices ont ainsi gagné des sommes considérables entre 2003 et 2007. Ils se présentaient sous des identités différentes pour jouer, mais des experts attentifs qui étudiaient les taux de réussite des joueurs ont observé que certains comptes réussissaient souvent des coups qu'ils n'auraient dû gagner que rarement. Nionio, le premier joueur repéré, obtenait un taux de réussite 20 fois supérieur, pour certaines positions de jeu, à celui des meilleurs joueurs de poker.

Les sites de jeux, obligés de reconnaître les anomalies et donc la tricherie, ont dû rembourser partiellement les joueurs roulés. Ce qui a d'ailleurs mis en péril leur équilibre financier. Dans cette histoire, les escrocs et leurs complices ont gardé l'essentiel des sommes acquises. Des études détaillées des parties jouées au cours de la période concernée indiquent que plus de 110 noms de joueurs fictifs avaient tiré des gains anormaux du jeu. Le montant des sommes volées grâce à la porte dérobée a été évalué à plus de 22 millions de dollars.

Lors du développement d'un logiciel, il est nécessaire de disposer de fonctions d'observation qui donnent des droits supérieurs à ceux des utilisateurs normaux. Cela facilite la maintenance, le repérage des

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

dysfonctionnements et leur correction. Il est tentant de laisser actives ces fonctions en conditionnant leur accès à la connaissance d'une clé ou d'une manœuvre particulière telle que l'appui simultané sur trois touches éloignées du clavier.

Le programmeur peut aussi se garder la possibilité de désactiver complètement le système informatique si celui auquel on l'a vendu ne paye pas son abonnement, ou s'il est devenu un ennemi, ou tout simplement si on veut l'inciter à acheter une nouvelle version du logiciel ou de la machine.

On peut également installer la porte dérobée après coup, sans que les développeurs en aient connaissance : la version modifiée du logiciel pourra par exemple mémoriser les codes des cartes bancaires utilisées et les envoyer à une adresse aux mains de pirates. La porte dérobée pourrait aussi donner le contrôle complet de l'ordinateur et, par exemple, en faire un esclave pour envoyer massivement des messages publicitaires. La prise de contrôle d'un ordinateur permet aussi de l'enrôler dans ce qu'on nomme des botnets (des armées d'ordinateurs sous contrôle), puis de les faire participer, à l'insu bien sûr de leurs propriétaires, à l'attaque massive d'un site internet, attaque qui rendrait celui-ci momentanément inopérant (attaque par déni de service).

Le réseau mis en danger

Parmi les affaires récentes les plus graves de porte dérobée, il y a celle concernant les équipements réseau commercialisés par la firme américaine F5-Network, un concurrent de Cisco qui emploie plus de 4 000 salariés et dont le chiffre d'affaires avoisine 2 milliards de dollars.

Le Français Florent Daignière découvrit le 12 février 2012 une grave faille de sécurité concernant une partie importante des machines vendues par F5-Network. Après en avoir averti les responsables de la firme, la faille fut rendue publique en juin 2012 : une porte dérobée donnait accès aux niveaux de contrôle les plus élevés des machines. En langage technique, elle permettait de devenir administrateur de la machine, laquelle aurait pu mener une attaque sur tout le réseau auquel elle participait. On corrigea la faille,

Portes dérobées et tricheries au jeu

Les portes dérobées autorisent celui qui les a placées à opérer des actions dont les utilisateurs n'ont pas connaissance : lecture d'informations privées, copie et envoi de données à des tiers, prise de contrôle partiel ou complet du système informatique, voire destruction de ce dernier.



© De Pra/Shutterstock.com

La plus célèbre affaire de tricherie au poker en ligne, qui a rapporté au moins 20 millions de dollars à ses protagonistes, était fondée sur une porte dérobée présente à l'insu des sites qui proposaient innocemment des jeux de Poker en ligne. La porte dérobée avait été installée par certains des ingénieurs qui avaient développé le programme : elle leur permettait de connaître les cartes cachées des autres joueurs.

Les portes dérobées sont susceptibles de concerner tous les types de systèmes ou de machines électroniques et obligent les autorités de surveillance des jeux de casino à Las Vegas à des mesures particulières, telles que le contrôle par un second technicien de toute modification opérée par un premier technicien. Ce soin méticuleux a été mis en place à la suite d'une affaire de porte dérobée installée dans les circuits des bandits manchots de casinos du Nevada.

Ron Harris, qui était technicien dans une entreprise de machines de casino, avait échangé les circuits de plusieurs machines (des EPROM) par des circuits qu'il avait programmés lui-même, pour qu'elles fassent gagner tout joueur effectuant une certaine séquence de jeu du type : insérer 3 pièces, puis 2 pièces, puis 2, puis 1, puis 3, puis 5. Il n'allait pas jouer lui-même ces séquences, car cela aurait été suspect, mais il faisait jouer des complices. Il fut arrêté non pas à cause des 24 jackpots qu'il gagna grâce à ces bandits manchots truqués, mais à cause d'une autre manipulation qui avait permis à l'un de ses complices de gagner au *Keno* un lot de 100 000 dollars qui attira l'attention des autorités et les conduisit à lui.

Il fut condamné à sept ans de prison (voir http://www.americancasinoguide.com/slot-machines/the-worlds-greatest-slot-cheat.html).

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

mais les raisons de sa présence dans les machines ne furent pas éclaircies.
Dans les logiciels *open source,* c'est-à-dire dont le programme de base est public et compréhensible, il est presque impossible de cacher des portes dérobées.

Les logiciels ouverts sont aussi concernés

Lors de la conception d'un logiciel, on utilise des langages dits de haut niveau tels que Java, Python, Fortran, C, Pascal, Prolog, etc. Comme les programmes écrits dans ces langages sont incompréhensibles par les machines, ils sont traduits, par des programmes nommés compilateurs, en langage de « bas niveau », ce qui permet aux machines de les exécuter. Les instructions en langage de haut niveau sont compréhensibles par un humain qui peut les contrôler, les modifier et les reprendre pour les perfectionner. Compilé en langage de bas niveau, un programme est illisible et il est difficile de savoir ce qu'il va faire et pourquoi, et donc de le modifier ou de le corriger. Il y a une opposition entre « exécutable par une machine » et « déchiffrable par un humain ».

Rendre public le code source d'un programme, c'est risquer que quelqu'un se l'approprie, le modifie, et en tire profit sous forme compilée. C'est pourquoi les programmes vendus le sont le plus souvent sous forme compilée, donc illisible. Malheureusement, cette pratique met les utilisateurs en danger puisque de tels programmes peuvent comporter des portes dérobées indétectables. Plus généralement, ils peuvent exécuter à l'insu de l'utilisateur toutes sortes de fonctions. Ce conflit d'intérêts entre utilisateurs et vendeurs de logiciels est à l'origine des logiciels libres.

L'assurance qu'un programme ne fait pas autre chose que ce que vous voulez impose de connaître le programme source en langage de haut niveau. D'ailleurs, l'utilisateur pourra, s'il est très méfiant, compiler lui-même le programme source pour être certain que l'exécutable qu'il utilise est vraiment celui issu du programme source. Il faut cependant un peu plus pour que l'on soit assuré d'un fonctionnement conforme à une description : des experts indépendants doivent examiner le programme source, ligne par ligne, et contrôler qu'il ne fait rien de plus que ce qui est annoncé.

Le système d'exploitation Linux est un programme ouvert et pourtant, il a été victime d'une tentative d'introduction de porte dérobée. Le 4 novembre 2003, David Miller, un développeur du noyau, ajoute deux lignes apparemment innocentes au programme. Ces lignes pouvaient être comprises comme n'ayant qu'un effet de prise en compte d'un cas particulier improbable pour éviter qu'il engendre une erreur. En fait, les lignes ajoutées avaient pour effet de rendre administrateur l'opérateur qui entrerait une séquence particulière de caractères. L'astuce était fondée sur une confusion possible entre plusieurs langages de programmation utilisant différents signes d'égalité, le signe = dans certains langages, le signe == dans d'autres.

Les deux lignes ajoutées avaient donc de bonnes chances de passer inaperçues et de créer une porte dérobée dans un programme pourtant ouvert. Les autres développeurs du programme identifièrent l'astuce et retirèrent la porte dérobée, prouvant ainsi l'intérêt des logiciels libres et ouverts. Retenons qu'une astuce, assimilable à un jeu de mots, permet de cacher dans un programme ouvert des fonctions particulières quasi invisibles, voire de graves lacunes de sécurité.

Un conflit ancien entre utilisateurs et États

Depuis longtemps, les experts en sécurité informatique défendent le principe que les meilleures méthodes cryptographiques doivent être disponibles pour tous, ce qui est le cas en France depuis 1998. L'idée inverse a pourtant été soutenue, et même traduite dans certaines lois à l'étranger : selon cette idée, seules des méthodes faibles de cryptographie devraient être autorisées, ou pire, toutes les méthodes cryptographiques autorisées devraient comporter des portes dérobées dont l'accès serait réservé aux autorités.

Dans un article de *Pour la Science (n° 290, juin 1999, pp. 50-51),* Ronald Rivest (le R de l'algorithme de chiffrement RSA) s'opposait clairement à ce désir de brider les méthodes de cryptographie autorisées ou de les munir d'une porte dérobée. Il faisait une intéressante comparaison : « La cryptographie protège les données ; les gants protègent les mains. La cryptographie protège contre les intrus et les espions industriels ; les gants protègent contre les coupures, la chaleur, le froid et les infections. La cryptographie peut gêner la police, qui ne pourra plus pratiquer d'écoutes téléphoniques ; les gants peuvent gêner la police qui trouve difficilement des empreintes digitales. La cryptographie est devenue bon marché et d'emploi facile ; les gants le sont depuis longtemps. » Puisqu'on n'interdit pas la vente et l'usage des gants et qu'on ne limite pas la qualité des gants vendus, pourquoi interdire l'usage de la cryptographie ou tenter de supprimer la sécurité qu'elle offre par des portes dérobées ?

L'une des méthodes, un temps défendue par l'administration américaine, était qu'à chaque fois qu'on envoie un message chiffré, on y joigne la clé de déchiffrement… en la chiffrant avec une autre clé dont seules les autorités connaîtraient la clé de déchiffrement associée. Tant que cette super-clé des autorités reste secrète et inutilisée, tout se passe comme si elle n'existait pas, et l'on peut mettre en œuvre les meilleures méthodes de cryptographie pour donner aux utilisateurs une sécurité aussi forte qu'ils le souhaitent. En revanche, en cas de besoin, pour une enquête ou pour établir une preuve, l'utilisation de la super-clé permet aux autorités de lire tout ce qu'elles veulent des échanges chiffrés entre utilisateurs.

Cette méthode de super-clé revient à associer volontairement une porte dérobée à toute méthode de chiffrement, porte dérobée réservée aux autorités. Le danger est que la super-clé de déchiffrement soit rendue publique à la suite d'un vol. Dans un tel cas, tous les messages respectant la procédure deviennent lisibles de tous, même les plus anciens. Pour reprendre l'analogie avec les gants, la méthode de la super-clé revient à munir les gants d'un dispositif électrochimique commandé par radio tel qu'un signal particulier déclenche

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

Edward Snowden et les portes dérobées

Grâce aux révélations d'Edward Snowden, on a su que la NSA tentait et réussissait parfois à introduire des portes dérobées dans certains programmes de cryptographie (comme celui d'un générateur pseudoaléatoire du NIST), se donnant ainsi la possibilité de déchiffrer facilement les communications de ceux qui les utilisaient : la NSA espionnait ainsi des citoyens américains, ce que les lois des États-Unis interdisent pourtant.



Le film *Snowden* du réalisateur Oliver Stone est sorti en 2016. Il retrace les péripéties de ce lanceur d'alerte toujours recherché par la police des États-Unis et aujourd'hui réfugié en Russie.

Récemment encore, une vieille idée pourtant combattue par tous les spécialistes de sécurité informatique a resurgi. Deux sénateurs américains, Richard Burr et Dianne Feinstein, ont déposé un projet de loi qui forcerait tous les acteurs des technologies de l'information à truffer de portes dérobées leurs matériels et logiciels. Le projet voulait accorder aux tribunaux américains le pouvoir d'exiger des entreprises telles que Microsoft, Apple, Google, Facebook, etc. qu'elles donnent accès à toutes les données des appareils qu'elles vendent et des services qu'elles offrent.

Comme c'est le cas depuis longtemps maintenant, un grand nombre d'experts se sont élevés contre cette idée qui, si elle était adoptée, reviendrait à affaiblir gravement tous les systèmes de sécurité pourtant de plus en plus nécessaires qui protègent les informations des particuliers et des entreprises. Comme l'écrivaient Pauline Glikman et Nicolas Glady de l'Essec (École supérieure des sciences économiques et commerciales) le 27 mai 2016 dans une tribune sur www.silicon.fr : « Si ce projet de loi américain était voté, les entreprises européennes se verraient donc dans l'obligation d'abandonner l'usage des appareils et services informatiques des fournisseurs américains. Ce serait un coup majeur porté à la compétitivité des États-Unis, qui verraient leurs clients se tourner vers les services chiffrés offerts par des entreprises non soumises à ces contraintes... »

Même aux États-Unis, où l'on sait que les révélations d'Edward Snowden ont déjà affaibli la confiance dans les entreprises et produits nationaux, le projet de loi fait l'objet de très vives critiques. Reste qu'il n'y a aujourd'hui aucun doute que les systèmes d'écoute et d'espionnage massifs mis en place par la NSA au niveau mondial sont un problème pour la souveraineté de tous les États, en même temps qu'un danger économique majeur... et que ces systèmes n'ont pas été désactivés.

la destruction simultanée de tous les gants. Certes, les autorités ne devraient utiliser ce message radio secret que dans des enceintes fermées ne laissant pas échapper le signal destructeur, et uniquement dans le but de s'attaquer à des gants mêlés à des affaires de banditisme ou de terrorisme, mais comment ne pas craindre un accident ou un détournement ?

Le FBI contre Apple

Ces questions ont récemment défrayé la chronique à propos des téléphones d'Apple. En février 2016, le FBI (*Federal Bureau of Investigation*, la police judiciaire américaine) demanda à Apple de l'aider à rendre accessibles les données du téléphone d'un des auteurs de la tuerie de décembre 2015 à San Bernardino, où 14 personnes périrent. Le problème n'était pas directement celui d'une porte dérobée, mais il se fondait sur l'idée très proche que le système de protection des téléphones d'Apple pouvait être contourné avec l'aide des ingénieurs d'Apple. En clair, le FBI ne doutait pas qu'une sorte de porte dérobée existait et demandait à Apple de la faire fonctionner pour lui livrer le contenu du téléphone.

Apple répondit qu'il ne voulait pas collaborer, non pas que cela fût pour lui impossible, mais parce que cela aurait été contraire à l'intérêt de ses clients. Plus précisément, le FBI demandait à Apple de lui donner un moyen d'éviter que ne fonctionne le système d'effacement automatique qui s'enclenche en cas de tentatives répétées d'accès aux données de l'appareil.

Tim Cook, le président d'Apple, a expliqué : « Le gouvernement des États-Unis a exigé qu'Apple prenne une mesure sans précédent qui menace la sécurité de nos clients. Nous ne voulons pas nous soumettre à sa demande, car cela aurait des conséquences bien au-delà du cas particulier concerné. La situation exige un débat public ; nous voulons que nos clients et tous les gens à travers le pays comprennent ce qui est en jeu. »

Quelques jours plus tard, l'affaire trouva un épilogue décevant et inquiétant pour les clients d'Apple : le FBI, avec une aide dont l'identité est restée cachée, réussit à accéder aux données du téléphone. Ce dénouement signifie tout simplement que les protections prétendues inviolables des téléphones d'Apple ne le sont pas, soit parce qu'un tiers sait les contourner, soit parce

© 360/Shutterstock.com

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

Computerworld UK staff, **The eight security backdoors that helped kill faith in security**, 2017 : www.computerworlduk.com/security/7-security-backdoors-that-heped-kill-faith-in-security-3634220/

Absolute poker and UltimateBet cheating scandals, World Casino Index, 2016 : www.worldcasinoindex.com/guide/absolute-poker-and-ultimatebet-cheating-scandals/

Safest poker sites, Ultimate Bet Review, 2016 : www.safestpokersites.com/ultimate-bet/

P. Bellanger, **La Souveraineté numérique**, Stock, 2014.

N. Perlroth *et al.*, **NSA able to foil basic safeguards of privacy on Web**, *The New York Times*, 5 septembre 2013.

F. Daignière, **F5 BIG-IP remote root authentication bypass vulnerability**, 2012 : www.trustmatta.com/advisories/MATTA-2012-002.txt

qu'Apple, sans l'avouer, a cédé aux injonctions du FBI et qu'il sait les contourner ! Il y a bien une porte dérobée ou un équivalent dans les téléphones d'Apple.

Les grandes firmes informatiques prétendent défendre la sécurité des systèmes et appareils qu'elles vendent et affirment refuser de placer des portes dérobées dans leurs machines et logiciels. Il serait naïf de les croire : il est certain que cela n'a pas toujours été le cas, et la collaboration entre les géants d'Internet et les autorités américaines a été prouvée à maintes reprises, en particulier à la suite des révélations du lanceur d'alerte Edward Snowden. La NSA (*National Security Agency*), grâce au programme de surveillance PRISM, a eu un accès direct aux données d'Apple, de Facebook, de Microsoft, de Google, d'AOL et de Skype, et il est vraisemblable que c'est encore le cas aujourd'hui.

Le temps des illusions est fini

Quand vous utilisez ces services, soyez certains que vos informations seront soigneusement rangées dans les immenses entrepôts de données de la NSA, dont la capacité de stockage est colossale. Le centre de la NSA récemment construit dans l'Utah aurait des capacités se comptant en centaines d'exaoctets (1 exaoctet = 10^{18} caractères). Certains médias évoquent même des yottaoctets (10^{24} octets), même si cela semble peu vraisemblable, du moins dans un avenir proche.

Une autre histoire un peu plus ancienne que celle des téléphones d'Apple montre que les autorités américaines (mais elles ne sont sans doute pas les seules), ne se contentent pas de demander publiquement qu'on leur communique les clés d'accès des portes dérobées concernant des appareils dont on prétend qu'ils n'en ont pas, mais qu'elles en insèrent secrètement !

En cryptographie, disposer de programmes qui engendrent rapidement des suites pseudoaléatoires est important, car ces méthodes servent comme composants de base à de nombreux algorithmes de chiffrement de données. Le NIST (*National Institute of Standards and Technology*, l'institut américain des normes et de la technologie) publie des conseils et des normes sur le sujet. Ces normes étaient largement suivies. Or la norme du *Dual Elliptic Curve Deterministic Random Bit Generator* (Dual-EC-DRBG) a été, sans qu'il ne subsiste aucun doute, manipulée par la NSA. Ce générateur contient une porte dérobée qui permet aux détenteurs de clés appropriées de contrôler la production des bits censés être pseudo-aléatoires et donc de casser les méthodes de chiffrement qui les utiliseraient.

Dès 2007 paraissaient des études suspectant l'existence d'une porte dérobée dans le Dual-EC-DRBG. Pourtant, le NIST l'indiquait parmi quatre méthodes recommandées pour des usages cryptographiques, ce qu'il a cessé de faire seulement en 2014. À nouveau, ce sont les révélations d'Edward Snowden qui ont permis de connaître le fin mot de l'histoire. Elles indiquent que la NSA avait travaillé sur la normalisation du Dual-EC-DRBG, jusqu'à devenir le responsable unique de sa formulation.

Le *New York Times*, qui a analysé les documents d'Edward Snowden, affirme même que la NSA dépense 250 millions de dollars par an (parfois en payant simplement les entreprises concernées) pour insérer dans les produits cryptographiques des portes dérobées ou des faiblesses lui permettant de casser les chiffrements. On comprend bien que la réputation du NIST en a pâti et que, dorénavant, ses normes sont considérées avec méfiance. C'est plus généralement le cas de nombreux produits et matériels américains, dont on sait qu'ils sont souvent conçus pour faciliter les tâches d'espionnage généralisé de la NSA.

La situation de domination et d'intrusion généralisée de systèmes étrangers (notamment américains) dans le monde numérique est un danger non seulement pour la vie privée de tous, mais aussi pour les entreprises dont les secrets techniques et commerciaux risquent de tomber dans des mains concurrentes ou adverses. Pierre Bellanger, dans un excellent livre sur le sujet (*voir la bibliographie*), évoque avec raison un grave problème de « souveraineté numérique ». ■

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

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

OFFRE DÉCOUVERTE

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE



1 AN - 12 Nos
59€
24% d'économie

2 ANS - 24 Nos
110€
29% d'économie

3 ANS - 36 Nos
159€
32% d'économie

BULLETIN D'ABONNEMENT

POUR LA SCIENCE

À renvoyer accompagné de votre règlement à : Pour la Science - Service abonnements - 19 rue de l'industrie - BP 90 053 - 67 402 Illkirch cedex

PAS474B

❑ **OUI, je m'abonne à *Pour la Science* en formule Découverte :**

- ❑ **1 an • 12 numéros • 59€** au lieu de ~~78,50€~~ **(D1A59E)**
- ❑ **2 ans • 24 numéros • 110 €** au lieu de ~~157 €~~ **(D2A110E)**
- ❑ **3 ans • 36 numéros • 159 €** au lieu de ~~235,50€~~ **(D3A159E)**



MES COORDONNÉES

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

_____

Code postal : _____

Ville : _____

Tél. : _____
Pour le suivi client (facultatif)

MON MODE DE RÈGLEMENT

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

❑ Par carte bancaire

N° _____

Date d'expiration _____ Clé _____

Signature obligatoire

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

Grâce à votre email nous pourrons vous contacter si besoin pour le suivi de votre abonnement. À réception de votre bulletin, comptez 5 semaines pour recevoir votre n° d'abonné. Passé ce délai, merci d'en faire la demande à pourlascience@abopress.fr

J'accepte de recevoir les informations de *Pour la Science* ❑ OUI ❑ NON et de ses partenaires ❑ OUI ❑ NON

Délai de livraison: dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31/01/17 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site www.pourlascience.fr. Conformément à la loi "Informatique et libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à *Pour la Science*.

SCIENCE & FICTION

Ralentir la lumière avec la Force

Depuis quelques années, contrôler la lumière jusqu'à la figer sur place n'est plus l'apanage de personnages de fiction. Les physiciens ont trouvé le moyen de la ralentir en laboratoire !

Roland LEHOUCQ et Jean-Sébastien STEYER. Illustration : Marc BOULAY

L'introduction du film *Star Wars : Le Réveil de la Force* (J. J. Abrams, 2015) montre une scène étonnante : Kylo Ren, le successeur de Dark Vador, utilise la Force pour stopper le tir de pistolet laser de Poe Dameron, le meilleur pilote de la Résistance. Par « stopper », il faut comprendre « arrêter en l'air » le pinceau lumineux émis par l'arme. Une fois le héros capturé, Kylo Ren retourne dans son vaisseau et la lumière stoppée redémarre.

Jouer ainsi avec la vitesse de la lumière n'est pas une première dans les œuvres de fiction. Dans son roman *Le Maître de la lumière*, publié en 1933, Maurice Renard narre une banale histoire de pièce hantée. Mais on n'y trouve nul fantôme. La clé du mystère est l'étrange « luminite » : « la lumière cheminant dans cette matière à une vitesse extrêmement freinée, on voit, de part et d'autre des plaques de luminite, ce qui se trouvait là jadis. Et plus la plaque est épaisse, plus le passé qu'elle montre est lointain, sur une face comme sur une autre. »

On retrouve la même idée dans la nouvelle *Lumière des jours enfuis* de l'écrivain britannique Bob Shaw (1966) où le « verre lent » est un matériau que la lumière met des années à traverser. Le procédé invoqué pour expliquer le phénomène est « un tunnel en spirale enroulé à l'extérieur du rayon de capture de chaque atome du verre ». L'argument ne paraît pas très scientifique, même si les mots utilisés veulent montrer le contraire. Dans sa série de romans de fantasy burlesque, *Les Annales du Disque-monde* (à partir de 1983), Terry Pratchett ne s'embarrasse pas de détails techniques pour justifier que, dans son univers, la lumière ne se propage qu'à quelques centaines de kilomètres par heure : c'est tout simplement à cause de « l'intensité plutôt embarrassante du champ de magie ».



GRÂCE À LA « FORCE », Kylo Ren, l'un des méchants du film *Star Wars : Le Réveil de la Force* (2015), est capable de stopper un tir de pistolet laser.

Dans notre monde, est-il possible de ralentir la lumière ? Avant de répondre à cette question, il faut se rappeler que la lumière est une onde électromagnétique et qu'on peut lui associer plusieurs vitesses. La vitesse de phase est la vitesse de l'onde porteuse, autrement dit celle à laquelle les maxima et les minima d'une onde électromagnétique sinusoïdale se déplacent. Dans tous les milieux matériels, la vitesse de phase d'une telle onde dépend de sa fréquence. Ces milieux sont dits dispersifs.

Superposer des ondes de diverses fréquences permet d'obtenir une onde plus complexe dont on définit la vitesse de groupe comme celle de l'enveloppe de l'onde. Pour une impulsion lumineuse utilisée dans les communications, la vitesse de groupe est celle du maximum de l'amplitude de l'impulsion et aussi celle à laquelle l'énergie se propage. Cette distinction entre vitesse de phase et vitesse de groupe a été proposée en 1880 par le physicien français Georges Gouy. En effet, ces vitesses sont *a priori* différentes, sauf dans le vide où elles se confondent et valent environ 300 000 kilomètres par seconde.

Lorsque la lumière traverse un milieu transparent, sa vitesse de phase est inférieure

© Pour la Science - Tous droits réservés



© 2017 Marc Boulay (marcboulay.fr) cossima-productions.com

ARRÊTER LA LUMIÈRE, la figer en plein vol, une idée impossible, réservée à la science-fiction ? Non. Grâce notamment à des condensats de Bose-Einstein – des gaz d'atomes ultrafroids qui ont des propriétés quantiques étonnantes –, les physiciens sont capables de ralentir une impulsion lumineuse.

à celle dans le vide, car les atomes mis en vibration par son passage la réémettent avec un retard. Ainsi, la vitesse de phase de la lumière dans l'eau est, par rapport au vide, réduite d'un quart. Ce phénomène est à l'origine de la réfraction, que l'on caractérise par un « indice de réfraction » : le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide et sa vitesse de phase dans un milieu transparent.

Même dans les cas les plus extrêmes, la réduction de la vitesse de phase est modeste : dans le diamant, dont l'indice de réfraction vaut 2,4, la lumière se propage à 125 000 kilomètres par seconde. On est encore loin de l'arrêter comme le fait Kylo Ren !

Coup de froid sur la lumière

Les physiciens ont trouvé le moyen de ralentir très fortement la lumière en jouant sur la vitesse de groupe. Pour ce faire, il faut créer artificiellement une forte dispersion dans un milieu. Imaginée dans les années 1910 par les physiciens français Léon Brillouin et allemand Arnold Sommerfeld, la lumière « lente » est restée une curiosité théorique jusqu'en 1999. L'équipe de la physicienne danoise Lene Vestergaard Hau, de l'université Harvard, a alors réussi à ralentir un faisceau lumineux à la vitesse d'environ 60 kilomètres par heure. Et l'année suivante, elle a ralenti la lumière à la vitesse d'un marcheur ! Pour réussir ce tour de force, deux ingrédients ont été nécessaires : un laser de commande qui produit de fortes densités d'énergie lumineuse et un condensat de Bose-Einstein, un gaz ultrafroid (à une fraction de degré au-dessus du zéro absolu), qui peut absorber fortement la lumière sur une faible distance, de l'ordre du centimètre.

Le laser de commande agit sur le gaz et le rend transparent autour d'une fréquence bien précise. L'indice de réfraction du gaz subit aussi une variation brutale sur le même intervalle de fréquence. Grâce à la transparence induite par le laser, une impulsion lumineuse ayant la bonne fréquence traverse le gaz sans être absorbée, et l'on montre que sa vitesse de groupe est d'autant plus faible que la variation de l'indice de réfraction est grande.

Dans cette expérience, il est même possible de stopper complètement l'impulsion en éteignant le laser de commande au moment où, ralentie, elle se trouve tout entière dans le condensat de Bose-Einstein. Lorsqu'on rallume le laser de commande, l'impulsion lumineuse repart et se propage comme si de rien n'était. Ce processus ne permet toutefois de stocker l'impulsion lumineuse qu'une milliseconde avant qu'elle ne se dégrade définitivement, à cause de l'agitation résiduelle des atomes du gaz froid.

Depuis cette expérience fondatrice, d'autres équipes ont cherché à ralentir la lumière dans un milieu moins difficile à produire qu'un condensat de Bose-Einstein. Ainsi, en 2003, l'équipe de Robert Boyd, de l'université de Rochester, a ralenti la lumière à une centaine de mètres par seconde dans un cristal d'alexandrite (un oxyde de béryllium et d'aluminium) à température ambiante. Et en 2004, l'équipe de Luc Thévenaz, à l'École polytechnique fédérale de Lausanne, a réussi à ralentir la lumière dans une fibre optique classique.

Si l'on comprend pourquoi Kylo Ren veut arrêter le tir laser de Poe Dameron, à quoi peut bien servir la lumière lente ? Une application concerne les routeurs et les commutateurs des réseaux de communication. Ils sont pour l'instant électroniques ; les remplacer par leurs équivalents optiques augmenterait la rapidité des commutations et la lumière lente permettrait de mettre les paquets en attente avant de les regrouper.

On pourrait aussi réaliser des antennes à commande de phase pour les radars et la téléphonie mobile. Ces antennes sont constituées de petits éléments qui émettent le même signal, mais retardé d'un élément à l'autre. En modulant, grâce à la lumière lente, le retard entre les éléments, on focaliserait à volonté l'onde résultant de la superposition de tous les signaux élémentaires.

Si les physiciens savent désormais faire varier la vitesse de groupe de la lumière dans des proportions considérables, une question reste en suspens : comment fait Kylo Ren pour créer un condensat de Bose-Einstein avec la Force ? ■

Roland LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay. J.-Sébastien STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. Marc BOULAY est sculpteur numérique.

Complétez votre collection !



Retrouvez tous les numéros depuis 1996 !

Commandez vos numéros sur

www.pourlascience.fr

POUR LA SCIENCE | Les ARCHIVES



IDÉES DE PHYSIQUE

Le fantôme du candidat

Faire apparaître sur scène un personnage qui se trouve à mille lieues de là n'a rien d'impossible : il suffit de projeter à plat son image, d'utiliser un film semi-transparent et de jouer sur les ombres et les lumières.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Tout récemment, l'utilisation d'« hologrammes » lors de spectacles musicaux ou de réunions politiques a fait le tour des médias : le public découvrait sur scène une image réaliste en relief (on dit de nos jours « 3D ») de danseurs ou d'un candidat à l'élection présidentielle, sans avoir besoin de lunettes spéciales.

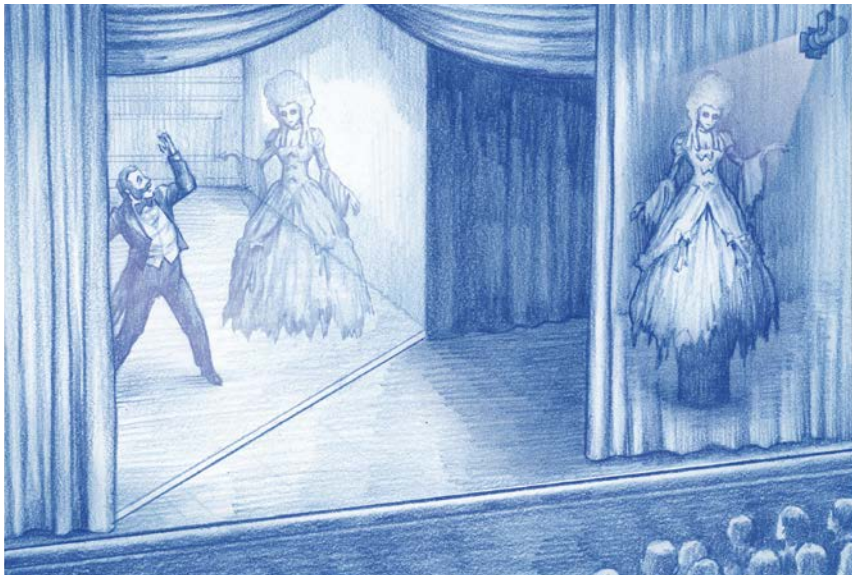
En réalité, il ne s'agit pas d'hologrammes, mais d'une simple projection sur un écran semi-transparent. C'est une adaptation d'une méthode connue depuis le XIXe siècle, sous le nom de fantôme de Pepper. Comment cette projection, qui inspire aujourd'hui les dispositifs d'« affichage tête haute » développés pour les pilotes d'avions et les conducteurs de voitures, crée-t-elle l'illusion du relief ?

Illusions au théâtre

Revenons au XIXe siècle. À cette époque où le spiritisme est en plein essor, Henry Dircks, un ingénieur anglais, invente (en 1858) un dispositif pour faire apparaître des fantômes sur une scène de théâtre. Il utilise pour ce faire une trappe, des miroirs et des jeux de lumière. Le principe de base est particulièrement simple et, comme nous allons le voir, nous l'avons tous involontairement expérimenté.

Lorsque, une fois la nuit tombée, nous entrons dans une pièce dont les volets ne sont pas fermés, nous voyons très bien l'extérieur à travers la vitre, dont nous pouvons même douter de la présence lorsqu'elle est parfaitement propre. En revanche, dès que nous allumons la lumière dans la pièce, la fraction réfléchie par la vitre (environ 8 %) est bien plus intense que la lumière qui nous parvient de l'extérieur. La vue de l'extérieur est alors remplacée par la vue de l'intérieur, sauf pour les objets lumineux (lampadaires de rue, phares des voitures…) qui viennent se superposer au reflet déjà présent. Réciproquement, en plein jour, on observe à travers la vitre l'image de la lampe allumée dans la pièce, superposée à la vue de l'extérieur.

Pour réaliser cette superposition d'images à des fins théâtrales, Henry Dircks eut l'idée de faire remonter à travers une trappe, et à l'aide d'un miroir incliné à 45 degrés, l'image d'une pièce située sous la scène vers une vitre disposée devant la scène avec la même inclinaison.



Dessins de Bruno Vacaro

UN FANTÔME SUR SCÈNE : cet effet peut être obtenu grâce à une vitre verticale orientée à 45 degrés par rapport aux spectateurs. Ces derniers voient le reflet d'un personnage présent dans les coulisses *(à droite)* et qui leur est caché. Les coulisses sont dans l'obscurité, mais le personnage à faire apparaître de façon fantomatique est éclairé.

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

LES AUTEURS




Jean-Michel COURTY
et Édouard KIERLIK
sont professeurs
de physique à l'université
Pierre-et-Marie-Curie, à Paris.
Leur blog : www.scilogs.fr/
idees-de-physique

Leur dernier livre s'intitule :
En avant la physique !
(Belin-Pour la Science, 2017).

John Pepper, un chimiste, britannique lui aussi, simplifia grandement le dispositif en le réduisant à une simple plaque de verre, placée devant la scène fortement éclairée. Cette plaque réfléchit le contenu d'une pièce obscure cachée sur le côté *(voir l'illustration page précédente)*. Quand la lumière de la pièce cachée est allumée et que celle de la scène est réduite, une forme lumineuse apparaît brusquement devant l'auditoire ! Succès assuré pour cette technique, que l'on retrouve aujourd'hui sous une forme adaptée dans les maisons hantées et autres trains fantômes des parcs d'attraction.

Une image projetée

Le procédé que l'on vient de décrire fait apparaître l'image d'un objet (ou d'un personnage) réel situé à proximité de la scène, mais caché du public. Comment faire apparaître une image de synthèse ou celle d'une personne absente ? En remplaçant la pièce cachée par un écran sur lequel est projetée l'image que l'on veut faire apparaître *(voir l'illustration ci-dessous)*. La luminosité des projecteurs actuels permet en effet d'obtenir une image aussi lumineuse qu'une personne réellement sur scène.

Toutefois, de nombreux problèmes pratiques sont à régler pour créer l'illusion de volume et de la profondeur. Il faut pour ce faire s'appuyer à la fois sur des astuces de physique et sur une bonne compréhension de nos perceptions.

Tout d'abord, il est hors de question d'utiliser une vitre. Outre la difficulté à la fabriquer en très grand format et à la transporter, une vitre présente une épaisseur et deux faces. Lorsqu'elle est fortement éclairée, se créent alors deux reflets, donc deux images, malgré les traitements antireflets qui ne font qu'atténuer un peu l'effet. Ce dédoublement n'est pas forcément gênant pour un fantôme, car cela accentue son immatérialité. En revanche, pour figurer une personne réelle, c'est rédhibitoire.

C'est pourquoi on préfère aujourd'hui aux vitres des films souples semi-transparents de type Mylar. Les difficultés ne sont hélas pas supprimées : d'une part le film doit être sans pli et suffisamment tendu pour ne pas vibrer au moindre courant d'air. D'autre part, sur le plan optique, le film doit se comporter de la même manière avec toutes les composantes de la lumière blanche, et cela tant en réflexion, pour ne pas perturber les couleurs de l'image, qu'en transmission, pour ne pas affecter celles des personnes ou du décor placés derrière le film.

Les meilleurs films s'approchent de plus en plus de ce comportement, mais il est bien souvent nécessaire de compenser certains défauts en ajustant savamment l'éclairage. Il faut ensuite ajuster la géométrie afin que le reflet de la projection se trouve au bon endroit pour le spectateur, notamment si l'on souhaite faire interagir la personne projetée avec une personne réelle présente sur scène.

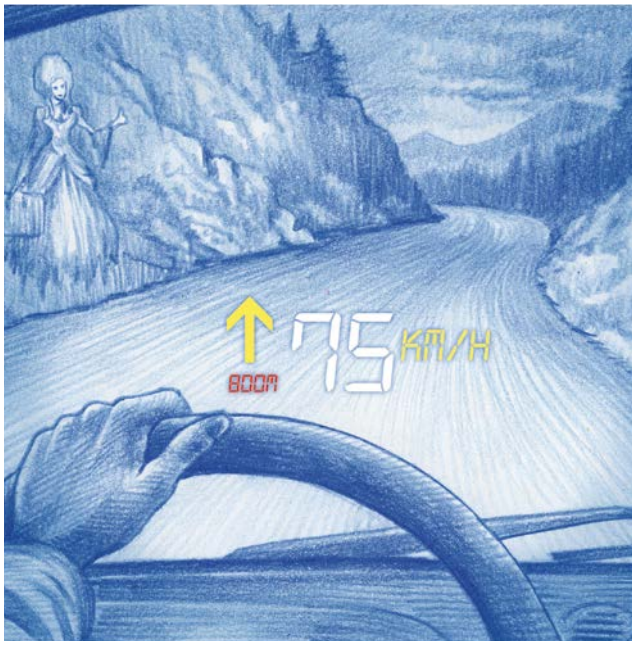
Tout se passe alors comme si le projecteur renvoyait directement l'image sur un écran situé sur la scène. Mais comment fait-on pour donner l'impression d'avoir devant soi une personne en chair et en os dans ses trois dimensions ?

Premier point : il faut faire oublier la présence d'un écran. Pour atteindre cet objectif, il est essentiel que la personne projetée soit, dans l'image, sur fond noir, ce qu'on réalise lors de la prise de vue ou par un traitement d'image. Il faut ensuite veiller à ce qu'il n'y ait aucune réflexion parasite

UNE IMAGE PROJETÉE sur un plan horizontal, invisible des spectateurs, et qui se reflète dans un film semi-transparent incliné verticalement à 45 degrés permet de donner l'illusion qu'un personnage est présent sur scène.



© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017



LE PRINCIPE DES DISPOSITIFS D'AFFICHAGE TÊTE HAUTE
est le même que celui des fantômes de Pepper et effets apparentés. S'y ajoute un système optique permettant de former l'image à une distance appropriée devant la personne, de telle façon qu'elle n'ait pas à accommoder ses yeux pour lire les informations affichées.

sur l'écran. Cela étant réglé, nous disposons alors d'une image bidimensionnelle au centre de la scène, dont on s'assure qu'elle respecte les règles de la perspective (taille et position de l'image par rapport au sol).

De la lumière en relief

Mais d'où vient l'illusion du relief ? À quelques mètres de distance et sur fond noir, la parallaxe (chacun de nos yeux perçoit des images différentes, ce qui nous aide à localiser l'objet regardé dans son environnement) et l'accommodation (qui permet de voir net à courte distance) jouent peu. Elles ont des rôles mineurs, au contraire de l'éclairage et des ombres propres : ce sont les différences de luminosité entre les diverses parties du visage ou du corps et la manière dont ces écarts de luminosité varient lorsque la personne se tourne ou se déplace qui fournissent à notre cerveau des indices sur sa forme et son volume.

Cela signifie que les éclairages de la scène de projection et de la scène de prise de vue doivent être rigoureusement identiques. En choisissant qui plus est des éclairages qui marquent bien les reliefs, nos sens sont dupés et l'illusion devient parfaite.

Aujourd'hui, on utilise aussi la superposition d'une image dans une scène dans les « affichages tête haute » destinés aux pilotes d'avions ou aux conducteurs de véhicules. Il s'agit de dispositifs qui affichent, dans le champ de vision de la personne au volant ou aux manettes, des informations sous une forme transparente, qui ne masquent pas la scène située au-delà *(voir l'illustration ci-contre)*. Le pilote ou le conducteur n'a ainsi pas besoin de tourner la tête ou les yeux pour les lire, contrairement à la situation où les informations sont lues sur le tableau de bord.

Affichage accommodant

Le grand avantage de ces dispositifs est que l'on peut former l'image à bonne distance devant le conducteur, de façon que celui-ci n'ait pas besoin d'accommoder sans cesse ses yeux lorsque son regard passe de la route aux informations affichées et inversement. Ces efforts d'accommodation se révèlent en effet encore plus fatigants que les mouvements oculaires.

Le principe de l'affichage tête haute est exactement le même que pour les fantômes de Pepper. Ainsi, pour les automobilistes, la projection a lieu soit sur une lame semi-transparente inclinée et placée dans le champ de vision, soit directement sur le pare-brise.

Toutefois, les contraintes géométriques sont différentes, car il faut former l'image à une distance appropriée du conducteur. En pratique, on choisit une distance de l'ordre de 2,5 mètres pour les informations telles que la vitesse et les limitations de vitesse. Pour les nouveaux affichages, qui incluent des informations de type « réalité augmentée », l'image est formée à plusieurs mètres pour qu'elle soit bien intégrée à la scène. Cela exige des dispositifs optiques assez élaborés qui agrandissent l'image et décalent sa position à l'aide de lentilles ou de miroirs courbes, mais le confort d'utilisation est devenu remarquable. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. W. Patterson et K. P. Zetie, **Exorcising Pepper's ghost**, *Physics Education*, vol. 52(2), article 023007, 2017.

M. K. Hedili *et al.*, **Microlens array-based high-gain screen design for direct projection head-up displays**, *Applied Optics*, vol. 52(6), pp. 1351-1357, 2013.

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

QUESTION AUX EXPERTS

Pourquoi les sondages électoraux se trompent-ils ?

Trois principales raisons expliquent que les sondages n'indiquent pas toujours l'état véritable de l'opinion.



Pascal MOLINER

Les sondages électoraux produisent des résultats qui, le plus souvent, se confirment dans les urnes. Toutefois, il arrive qu'ils se trompent de façon spectaculaire : par exemple le 21 avril 2002 en France lors de la qualification de Jean-Marie Le Pen au deuxième tour de l'élection présidentielle, le 23 juin 2016 lors du référendum sur l'appartenance du Royaume-Uni à l'Union européenne, ou encore le 8 novembre 2016 avec la victoire de Donald Trump à l'élection présidentielle des États-Unis. Trois grands facteurs peuvent être à l'origine de ces erreurs.

Tout d'abord, on comprend qu'un sondage sera moins fiable si on le réalise auprès d'un échantillon qui ne reflète pas au plus près les caractéristiques de la population globale appelée à voter. Pour s'approcher au mieux de cette représentativité, les sondeurs pratiquent le « redressement des résultats bruts » : ils mesurent les biais connus et corrigent.

Toutefois, en matière de sondage politique, cette méthode n'est possible que lorsque le scrutin anticipé peut être comparé à un scrutin antérieur. Ce n'est pas toujours le cas, comme en témoignent les récentes primaires de la droite en France ou le référendum sur le Brexit. En outre, puisque les sondages sont réalisés par téléphone ou *via* Internet, ils laissent dans l'ombre des pans entiers de la population : ceux qui n'ont pas de poste de téléphone fixe ou qui n'ont pas d'accès au Web.

Un deuxième facteur est que, avec l'emprise décroissante des grandes idéologies, le vote est de moins en moins une expression identitaire et de plus en plus un choix raisonné ou au contraire pulsionnel. Dans le premier cas, il résulte d'un calcul dont la solution peut n'apparaître clairement aux électeurs qu'à quelques jours du scrutin (par exemple celui du premier tour des primaires de la droite). Dans le second, la pulsion peut longtemps rester contrôlée jusqu'à ce qu'elle s'exprime dans l'isoloir, laissant parfois un goût amer à l'électeur qui vient de l'assouvir (cas du vote pour ou contre le Brexit).

Dans tous les cas, le vote peut être précédé d'une longue période d'indécision. Sa déconnexion des identités sociales, familiales et parfois même politiques accroît son imprévisibilité, y compris aux yeux de l'électeur lui-même.

Non-représentativité de l'échantillon, volatilité et masquage des opinions

Un troisième facteur est le phénomène de « zone muette », étudié en psychologie sociale depuis les années 2000. Il se produit lorsqu'une opinion est discréditée par un ou plusieurs groupes occupant des positions de domination sociale (autorité morale, médias prépondérants, pouvoir financier, etc.). Confrontés à la pression normative de ces groupes, les individus mentent pour masquer leur adhésion à l'opinion indésirable, car son affichage constitue une menace identitaire. C'est ce qui explique que le masquage peut se produire même dans des conditions d'anonymat.

Mais les sondés ont un autre moyen de masquer leurs opinions : refuser de participer au sondage. Les personnes qui adhèrent à une opinion contre-normative seront alors sous-représentées. Pour endiguer le phénomène, les sondeurs tentent de redresser leurs échantillons, mais dans quelles proportions faut-il le faire ? À l'évidence, ces proportions étaient insuffisantes en 2002, lors de l'élection présidentielle française.

Le meilleur moyen de neutraliser le masquage consiste à faire baisser la pression normative sur les sondés. Dans ce sens, il vaudrait peut-être mieux ne pas interroger ces derniers sur leurs intentions personnelles, mais plutôt sur ce qu'ils perçoivent des intentions de vote de leur entourage proche.

Non-représentativité, volatilité et masquage peuvent évidemment se cumuler ou interagir. Les problèmes de représentativité trouveront probablement des solutions techniques. Il en va autrement de la volatilité ou du masquage, qui concernent davantage le rapport des citoyens au pouvoir politique ou médiatique et aux sondages. En l'absence de réponses à ces difficultés, l'avenir des sondages électoraux sera compromis.

Pascal MOLINER est professeur de psychologie sociale à l'université de Montpellier III.

© Shutterstock.com/Art Vandelay

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

SCIENCE & GASTRONOMIE

Fritures protégées

Les composés phénoliques des aliments réagissent avec les aldéhydes toxiques engendrés par le chauffage de l'huile : la friture est moins nocive qu'on ne le pense.



© Jean-Michel Tinne

Hervé THIS

La tentation finaliste est constante et Voltaire a eu raison de mettre en scène Pangloss, qui affirmait que tout était pour le mieux dans le meilleur des mondes. Ainsi, raisonnent les finalistes, le nez est merveilleusement adapté au port de lunettes et il est extraordinaire que les fruits comblent nos besoins en sucre !

Bien sûr, la biologie de l'évolution combat cette tentation téléologique. Pour les fruits, par exemple, il est plus raisonnable de penser que les primates ont coévolué avec les plantes : ces dernières, en évoluant vers la production de fruits colorés et chargés de divers sucres, attirent des animaux qui repèrent mieux les fruits dans le couvert végétal, les consomment et disséminent les graines, ce qui propage l'espèce végétale et réduit la concurrence des autres plantes.

De façon analogue, en cuisine, notre attachement à des traditions suscite parfois des discours de mauvaise foi : nous justifions nos goûts par des bienfaits qu'ils apporteraient ou par des pratiques d'élimination des inconvénients. Par exemple, nous nous autorisons à manger des frites sous prétexte de bien les éponger au sortir du bain de friture, pour éviter l'absorption d'huile.

Rosario Zamora et ses collègues de l'institut de la Grasa, à Séville, ont récemment apporté de l'eau à notre moulin en identifiant des mécanismes moléculaires qui réduisent la toxicité des fritures : des aldéhydes toxiques produits lors de cette forme de cuisson sont piégés par des polyphénols présents dans les aliments frits. Le monde est bien fait !

Si la friture a l'avantage d'être une cuisson rapide et de former une couche croustillante, elle a l'inconvénient de réunir des lipides, de la chaleur, de l'oxygène et souvent des catalyseurs d'oxydation, tel le fer présent dans le sang. Se forment alors des produits toxiques, en même temps que des goûts désagréables, possibles indicateurs de toxicité.

Parmi les produits toxiques formés, on a identifié des aldéhydes, tels l'acroléine et le crotonaldéhyde. Les deux composés comportent un groupe carbonyle (C=O), caractéristique de la fonction chimique aldéhyde, mais aussi une double liaison entre les atomes de carbone voisins de celui qui porte le groupe aldéhyde : toutes les conditions d'une forte réactivité chimique sont réunies.

Des réactions qui réduisent la toxicité

Dans les huiles de friture, l'acroléine est bien plus abondante que le crotonaldéhyde, et les deux composés sont heureusement plus concentrés dans l'huile que dans les aliments frits. Pourquoi ?

Cherchant des produits de réaction entre les aldéhydes et les composés phénoliques des aliments, les chimistes espagnols ont exploré des huiles de friture et des oignons frits du commerce. Les oignons rouges, notamment, contiennent une classe de composés phénoliques bien caractérisés, les flavonoïdes, et, surtout, de la quercétine et ses dérivés « glycosylés », c'est-à-dire liés à des sucres. Les chercheurs sévillans ont constaté que la première étape de la réaction des aldéhydes avec ces composés phénoliques est une addition (la molécule d'aldéhyde se lie à celle du composé phénolique). Les produits d'addition sont ensuite stabilisés par des cyclisations de l'aldéhyde, des parties de ce dernier réagissant avec des groupes du composé phénolique.

Les chimistes ont alors identifié et dosé les aldéhydes dans les vapeurs qui s'élèvent au-dessus des fritures. Le dosage de l'acroléine et d'autres aldéhydes a montré que cette évaporation réduit leur concentration dans l'huile : coup de chance, aurait dit Pangloss.

En revanche, quand l'huile de friture reçoit des oignons, la diminution de la concentration en aldéhydes dissous dans l'huile est plus faible. L'optimisme panglossien doit-il être abattu ? Non, car il est apparu que ces aldéhydes réagissent avec les polyphénols contenus dans les aliments frits. De surcroît, diront nos optimistes, ces réactions des aldéhydes avec les composés phénoliques s'ajoutent à celles avec les acides aminés ou les résidus d'acides aminés des protéines. Et, cerise sur le gâteau, si ces dernières réactions contribuent à des changements de goût appréciés, c'est aussi le cas de la réaction avec les composés phénoliques. Il reste à savoir exactement comment, mais la conclusion est que la nature nous comble de ses bienfaits. ■



Hervé THIS, physicochimiste, est directeur du Centre international de gastronomie moléculaire AgroParisTech-Inra et directeur scientifique de la fondation Science & culture alimentaire (Académie des sciences).

Retrouvez la rubrique Science & gastronomie sur www.pourlascience.fr

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

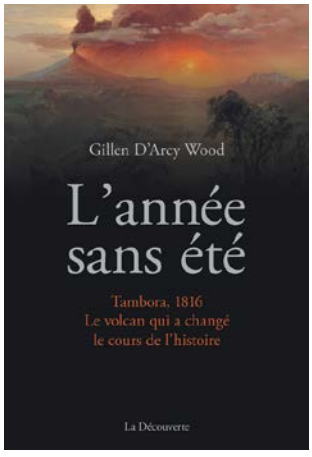
CLIMATOLOGIE

L'Année sans été

Gillen d'Arcy Wood

La Découverte, 2016
(304 pages, 22 euros).

Été 1816. Lord Byron, Percy Bysshe Shelley, son épouse Mary et quelques amis séjournent sur les bords du lac Léman. Le temps est exécrable, et pour meubler les soirées pluvieuses, ils inventent des histoires de fantômes. Celle de Mary deviendra Frankenstein, chef-d'œuvre de la littérature fantastique.



Ce que ne savent pas ces touristes anglais, c'est que la météo abominable de ce que l'on nommera « l'année sans été » a ses causes dans les lointaines îles de la Sonde. Sur l'île de Sumbawa, le 5 avril 1815, le volcan Tambora est entré en éruption. L'énorme explosion a en grande partie détruit la montagne, dévasté l'île en faisant des milliers de morts, et éjecté un nuage de cendres qui s'est étalé jusqu'à plus d'un millier de kilomètres de distance. Mais les conséquences s'étendent bien au-delà du cadre régional, et pas seulement dans le domaine de la littérature, comme le raconte brillamment Gillen d'Arcy Wood dans ce livre remarquable.

Les particules injectées dans l'atmosphère ont profondément perturbé le climat mondial pendant plusieurs années, avec des résultats aussi dramatiques que divers : mauvaises récoltes provoquant disettes en Europe centrale, famines en Irlande et en Chine, épidémie de choléra qui, partie de l'Inde, dévaste le monde à partir de 1817, catastrophes glaciaires dans les Alpes suisses (avec pour résultats positifs l'élaboration de la théorie des périodes glaciaires). Des années après l'éruption, ses effets se font encore sentir, avec notamment une grande crise économique aux États-Unis au début des années 1820.

L'auteur s'est penché sur les conséquences de l'éruption du Tambora avec un soin méticuleux, en explorant des sources jusqu'ici largement ignorées (notamment en Chine). Le résultat est une enquête historique et scientifique passionnante, non seulement instructive, mais aussi agréable à lire. Elle allie la précision scientifique aux anecdotes significatives, et est bien illustrée de documents d'époque et de diagrammes explicatifs. Ce livre captivant nous rappelle que si l'homme est capable de nuire à la planète qu'il habite, les colères de celle-ci peuvent aussi mettre sa civilisation en grand danger.

Eric Buffetaut
CNRS-ENS, Paris

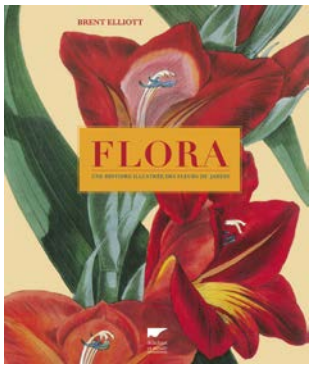
BOTANIQUE

Flora

Brent Elliott

Delachaux & Niestlé, 2016
(336 pages, 45 euros).

Le remarquable *Flora* de Brent Elliott, sous-titré *Une histoire illustrée des fleurs de jardins*, vient d'être réédité. En mieux ! Pour rassembler ces



pages rares, l'auteur a exploité la bibliothèque Lindley de la Royal Horticultural Society, soit la plus importante collection d'ouvrages de botanique et de jardinage du monde. Les ouvrages les plus anciens de cette extraordinaire bibliothèque remontent à la Renaissance. Les fleurs de jardin, bien plus que les fleurs sauvages, ont en effet suscité une passion immense et ancienne.

De fait, le luxe des planches reproduites ici est inouï : la plupart d'entre elles ont été colorées à la main et proviennent de livres ou de revues édités à un très petit nombre d'exemplaires. Ces publications réservées à une petite élite de collectionneurs fortunés décrivent des variétés de fleurs qu'ils étaient les seuls à pouvoir s'offrir et cultiver. Plantes rares, variétés uniques, ouvrages de luxe, *Flora* montre un pan de l'histoire du jardinage qui n'est pas celle des plus pauvres.

Ce livre est constitué de courtes notices historiques sur de nombreux cultivars rassemblés par continent d'origine. Ces textes permettent de comprendre l'origine et la diffusion de ces plantes qui n'existent souvent plus dans les jardins d'aujourd'hui. Ainsi, ce beau livre illustre l'incroyable diversité des fleurs ornementales obtenues par les jardiniers. Car ces derniers ne cultivent pas des plantes sauvages, mais bien des plantes transformées par la sélection artificielle. Ces plantes sont dites alors améliorées, un terme magnifiquement orgueilleux.

Même si chaque chapitre s'ouvre sur un petit texte historique et que le livre s'achève sur un ensemble très utile de petites biographies, *Flora* ne propose pas de replacer l'acquisition et la création de ces plantes dans une histoire plus vaste. Est-ce grave ? Car le nombre de plantes figurées, la beauté des planches comme la diversité de style des illustrateurs suffisent à rendre l'ouvrage captivant.

Valérie Chansigaud
Laboratoire SPHERE, CNRS-Université Paris-Diderot

GÉOGRAPHIE

Trouver le Nord

Olivier Le Carrer, illustrations de Sibylle Le Carrer

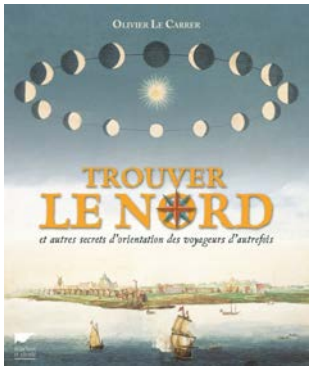
Delachaux et Niestlé, 2016
(192 pages, 32 euros).

Un livre beau et chaleureux sur les anciens secrets de navigateurs. L'abondante iconographie est attrayante. La juxtaposition de cartes récentes et anciennes fait voir l'évolution de la représentation des mers et des continents au cours des siècles. Des schémas expliquent les positions des astres et le fonctionnement des instruments permettant de faire le point. Des photos, des illustrations d'époque, montrent des paysages extraordinaires et les engins divers qui ont permis d'y accéder.

Cette iconographie accompagne une interrogation émue sur l'ingéniosité humaine : comment des voyageurs qui se sont aventurés sur des terres ou des mers inconnues, et disposant d'infiniment moins de moyens techniques que nous, ont-ils réussi à s'orienter ?

© Pour la Science - n° 474 - Avril 2017

Analysant ce que nous savons (qui est parfois mince) des expéditions de Pythéas, de Cook, de Christophe Colomb, de Marco Polo, des Polynésiens, de Mermoz, etc., Olivier Le Carrer décrit l'orientation comme une espèce d'art total, ou de science totale si on préfère. Partout peut se dissimuler un indice. Les explorateurs lisent le paysage, comme nous lisons une carte. Un marin doit être attentif non seulement au ciel, aux étoiles, aux vents, mais aussi aux poissons et aux oiseaux : certaines espèces restent près des côtes, donc indiquent qu'une terre est proche. Et les dauphins peuvent l'informer que, s'il ne change pas de cap, il va droit sur des récifs. Un explorateur terrestre « peut retrouver sans trop de mal le vallon qu'il a arpenté trois jours plus tôt, pour peu qu'il prenne le temps de réfléchir aux lois immuables de la nature, ruisseaux, rivières et grands fleuves formant des réseaux qui peuvent constituer autant de fils d'Ariane ».



Ainsi, Lewis et Clark, explorateurs du continent nord-américain en 1804-1806, ne disposant d'aucune carte fiable, ont pu se séparer en se donnant rendez-vous quarante jours plus tard quelque part en aval sur le Missouri – et honorer ce rendez-vous ! « Vidé de son sens aujourd'hui par le développement de la téléphonie mobile, l'art du rendez-vous en pleine nature a longtemps représenté une sorte de sommet dans la pratique de l'orientation. »

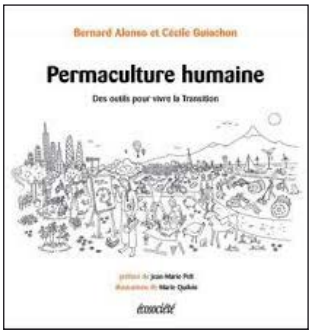
L'admiration que l'auteur voue aux exploits de ce genre n'exprime aucun passéisme. Mais les moyens actuels ne mettent pas à l'abri des déboires. Une carte, fût-elle sur support numérique, laisse toujours échapper une part du réel, car la cartographie est un art de la simplification. Le GPS inspire confiance, ce qui fait prendre des risques qu'on n'aurait pas pris autrefois. D'où des accidents. L'essence de l'orientation est l'incertitude, il faut surtout ne jamais être trop sûr de soi, avertit l'auteur. Ne peut-on voir là une leçon de vie en général ?

Didier Nordon

■ AGRONOMIE

Permaculture humaine

B. Alonso et C. Guiochon
Écosociété, 2016
(208 pages, 25 euros).



Le terme de « permaculture » est la contraction anglaise de *permanent* et de *culture*. Il désigne une approche systémique consistant à s'inspirer de modèles observables dans la nature et à les transposer dans les organisations sociales afin de créer des écosystèmes viables. L'idée a longtemps été cantonnée à la réflexion sur les pratiques agricoles, mais les auteurs nous invitent dans cet ouvrage à élargir le champ de la réflexion à l'ensemble des activités humaines. Les domaines qu'ils examinent incluent l'économie, l'habitat, l'alimentation, les relations sociales...

L'enjeu est de taille, puisqu'il s'agit de réagir à la prise de conscience du réchauffement climatique en cours, de la « rurbanisation » (l'urbanisation de la campagne) qui nous fait perdre des terres agricoles précieuses pour l'avenir commun et du fait que les crises économiques et sociétales s'enchaînent et se ressemblent. L'objectif de ce livre est de proposer une transition tant personnelle que sociale amenant à la définition des espaces écologiques possibles dans le cadre d'un développement durable.

Il s'agit donc indéniablement d'un ouvrage militant, mais ses auteurs ne sont pas pour autant dogmatiques. Ils balaient un large éventail de situations différentes qui en font tout l'intérêt. Les prises de position sont nuancées. Des points d'interrogation persistent quand le consensus scientifique manque. Tant mieux !

Cette invitation à anticiper le changement pour ne pas avoir à le subir est bienvenue. La « permaculture humaine » y apparaît ainsi comme une chance face à la perte de sens dans nos sociétés si dispendieuses du bien commun.

Bernard Schmitt
CERNh, Lorient

Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur www.pourlascience.fr



Islam et science

Alexandre Moatti
PUF, 2017
(196 pages, 14 euros).

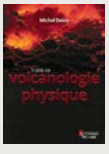
Dans ce livre clair et concis pour un tel sujet, un historien des sciences passe en revue les positions vis-à-vis de la science d'un certain nombre de penseurs récents de l'islam, tels Sayyib Qutb, René Guénon, Ziauddin Sardar et Tariq Ramadan. Le panorama qu'il dresse révèle parfois des positions modérées, mais aussi, souvent, une incompréhension de ce qu'est la démarche scientifique et l'affirmation – inquiétante pour tout rationaliste – que la foi a la primauté absolue sur la science. Ce que l'on retrouve, sous une forme ou une autre, dans d'autres religions.



L'Âme et l'urine

Didier Nordon
Champ Vallon, 2017
(144 pages, 17 euros).

Suspendre son jugement tant que l'on n'est pas sûr, c'est pratiquer le scepticisme scientifique ; juger systématiquement que rien n'est jamais sûr sinon le pire, ce n'est pas être sceptique, mais pessimiste. Hanté par la fragilité logique qu'il décèle partout, même dans les résultats scientifiques, un compagnon de route de *Pour la Science* nous régale ici par ses considérations grinçantes sur l'absurdité de notre nature, de nos actions et de nos pensées. La multitude de ses points de vue désabusés et décourageants, mais toujours surprenants, constitue une lecture stimulante.



Traité de volcanologie physique

Michel Detay
Lavoisier, 2017
(480 pages, 89 euros).

Un tel traité manquait au public francophone. L'auteur, hydrogéologue, est un infatigable explorateur des volcans du monde, dont il excelle à caractériser les paroxysmes. Avec le soutien bienveillant de plusieurs volcanologues, il a couché dans des textes clairs, agrémentés de schémas colorés, les connaissances fondamentales à avoir en morphologie et géodynamique volcaniques avant de discuter de « plomberie », de pétrologie, d'hydrologie volcanique, de climat et de volcans extraterrestres... Une éruption bienvenue de bonne vulgarisation !

BLOC-NOTES

de Didier Nordon

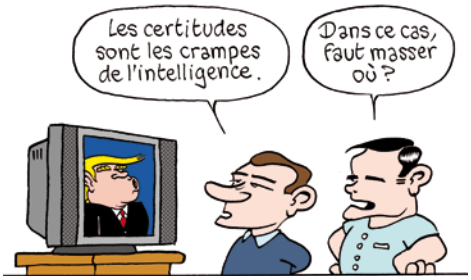
MIASMES ARCHÉOLOGIQUES

Le taux anormal d'enfants mentalement retardés dans ce quartier vient d'être expliqué grâce à une trouvaille archéologique lors de la construction d'un parking souterrain. On a découvert des vestiges prouvant qu'une université s'élevait jadis en cet endroit. Les thèses, les querelles d'écoles, les congrès qui s'y sont tenus ont saturé l'air de résidus polluants – poncifs, jargons, quolibets, soumission aux maîtres, subtilités byzantines, principes méthodologiques… Inhalés par de jeunes enfants, ces miasmes provoquent une détérioration cérébrale. Cette université datait de l'époque médiévale et a disparu depuis longtemps, mais l'imprégnation qu'elle a laissée se révèle durable.

INTELLIGENCE À ENTRETENIR

Dans *Le Monde* daté du 4 janvier 2017, un chercheur déclarait : « N'oubliez jamais que l'intelligence est un muscle qu'il faut entretenir. » Le bien-fondé de cette prescription paraît évident… à un détail près : comment la mettre en œuvre ?

Vautré sur un canapé, je sais que mes muscles sont inactifs. À la piscine ou en salle de musculation, je sais qu'ils sont actifs. Je puis même savoir à peu près lesquels travaillent, lesquels sont en repos. Mais l'intelligence, comment savoir si je suis en train de l'exercer ? Il n'est pas certain que je le fasse en me livrant à une étude ardue : affronter avec obstination une tâche difficile peut relever d'une routine d'abruti. Symétriquement, je puis regarder avec intelligence une débilité à la télévision. C'est même un art prisé de certains philosophes ou sociologues, que de manifester leur admirable subtilité dans l'analyse d'œuvres nunuches.



L'intelligence est partout et nulle part. On ne peut pas l'isoler, l'exhiber, la travailler, en contempler les progrès, comme on le fait de ses biceps. Le précepte selon lequel il faut l'entretenir comme un muscle est indiscutable, mais inutilisable.

L'EFFORT DE PENSER LIBREMENT

Jouir de la liberté de pensée en tant que liberté publique ne signifie pas échapper à toute contrainte – pas plus que jouir de la liberté de mouvement ne signifie pouvoir voler comme un oiseau. Ce qui se passe dans nos cerveaux garde du mystère, donc les contraintes qui pèsent sur notre pensée aussi. Du coup, le sens exact d'une expression telle que « penser librement » nous échappe.

Disons néanmoins qu'un penseur est d'autant plus libre qu'il se laisse moins influencer par des éléments dont il n'a pas



conscience. Il doit donc repérer, pour s'en garder, les préjugés auxquels le poussent son éducation, sa tournure d'esprit, sa position sociale, son inscription dans l'espace et dans le temps. Par ailleurs, dans le domaine où il travaille, il gagne en liberté à mesure qu'il apprend à juger la qualité des informations qui circulent, se dégage des évidences qui cessent d'en être si l'on y réfléchit, remet en contexte ses prédécesseurs afin d'évaluer ce qu'il en retient et ce qu'il écarte. C'est un travail énorme. Nul, ou presque, n'a la force de l'accomplir dans plusieurs domaines. Il n'est donc pas étonnant qu'un penseur, libre dans son domaine, soit, en dehors, soumis aux idées dominantes et tienne sans recul des propos convenus.

C'est à se demander si essayer de penser librement vaut la peine…

LE RISQUE DE LA PRÉTENTION



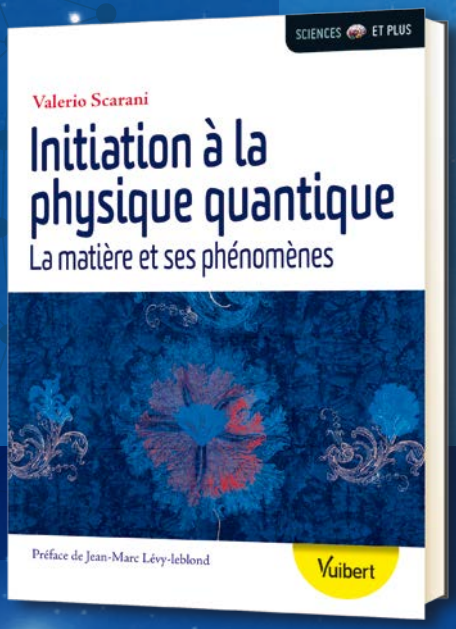
L'aphorisme est un genre trompeur. La brièveté tranchante a l'air de le caractériser. Mais les aphorismes ne vont en général pas seuls. Ils appartiennent à un recueil. Alors, même si chacun sonne comme une maxime irrévocable, leur ensemble peut receler des frictions, d'où plus de nuances qu'on ne l'aurait cru *a priori*.

D'autres genres ont d'autres façons de leurrer. Le roman brouille les limites entre réalité et fiction. Le traité, la somme, se présentent comme plus universels ou définitifs qu'ils ne sont. Le reportage donne l'illusion que les observations éparses faites sur le terrain par le journaliste rendent compte de la situation d'ensemble. Avec ses moyens propres, chaque genre mystifie. Sauf un, bien sûr : le genre scientifique. Pardi, il a fait vœu de vérité ! Patatras, le voici suspect. Les articles dénonçant la fraude en son sein sont devenus légion.

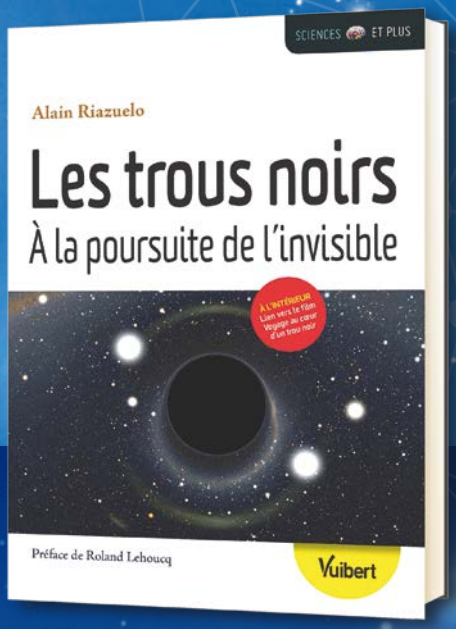
Là comme ailleurs, prétendre incarner une vertu est risqué. Être surpris à participer à une partie fine ne change rien au statut d'un noceur patenté, mais peut ruiner le fonds de commerce d'un héraut de l'ordre moral. Prendre des libertés avec la vérité peut faire la gloire d'un romancier (« Quelle imagination prodigieuse ! »), mais anéantir la réputation d'un scientifique. ■

Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal 5636 – Avril 2017 – N° d'édition M0770474-01 – Commission paritaire n° 0917 K 82079 – Distribution : Presstalis – ISSN 0 153-4092 – N° d'imprimeur 216192 – Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé.

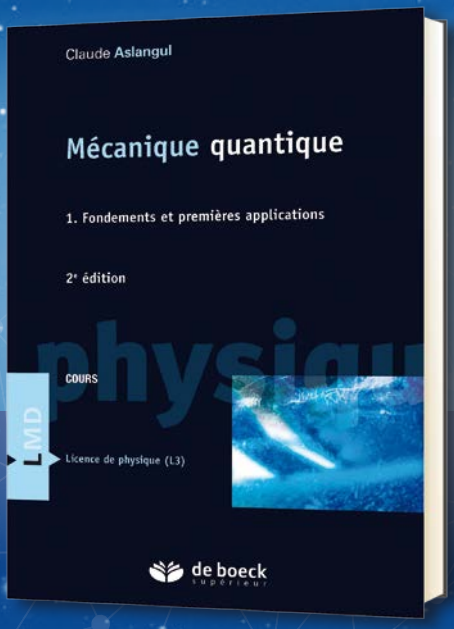
Découvrez la physique quantique



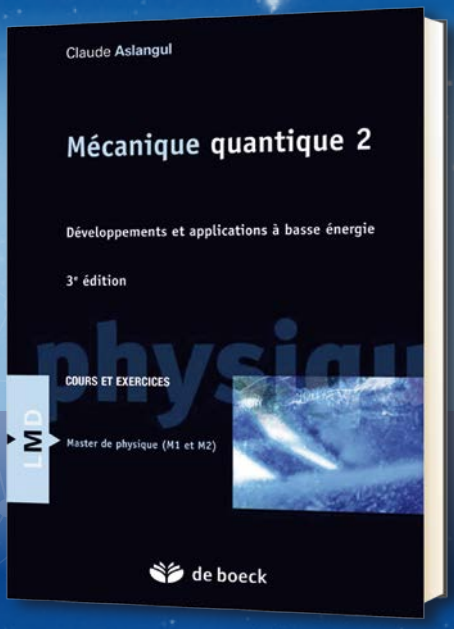
192 p. • 1ère éd. 2016 • **14,90€**
ISBN : 9782311403060



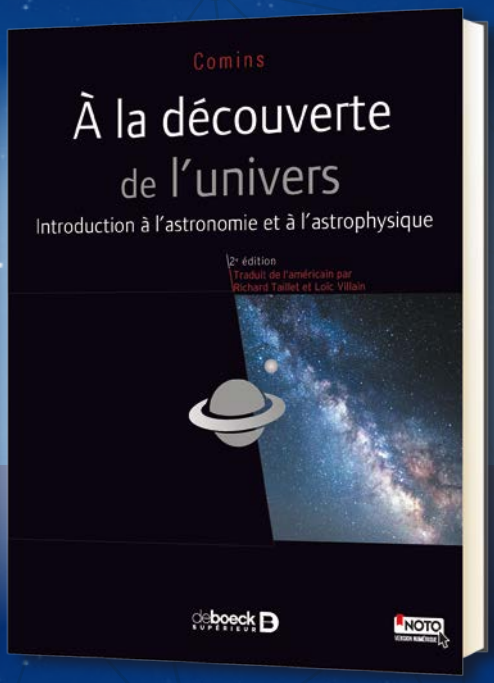
208 p. • 1ère éd. 2016 • **17,90€**
ISBN : 9782311403145



744 p. • 2e éd. 2016 • **39,00€**
ISBN : 9782807302952



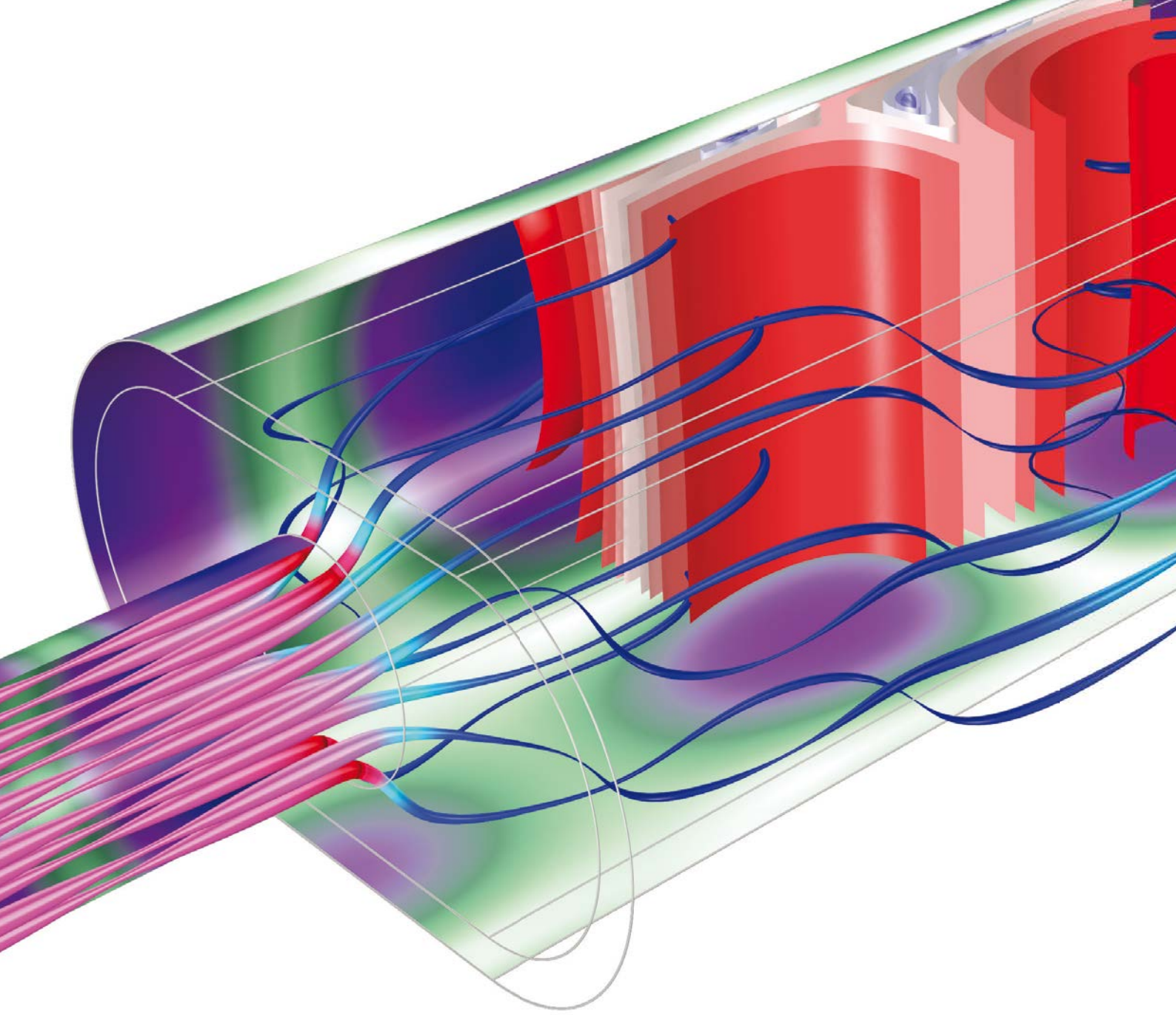
1040 p. • 3e éd. 2015 • **39,00€**
ISBN : 9782804191153



536 p. • 2e éd. 2016 • **49,90€**
ISBN : 9782807302945

En librairie ou sur www.deboecksuperieur.com

deboeck SUPÉRIEUR



LA MULTIPHYSIQUE POUR TOUS

avec COMSOL Multiphysics®

Les outils de simulation numérique viennent de franchir une étape majeure.

Dépassez les défis de la conception avec COMSOL Multiphysics®. Avec ses puissants outils de modélisation et de résolution, obtenez des résultats de simulation précis et complets.

Développez des applications personnalisées à l'aide de l'Application Builder, et déployez-les au sein de votre organisation et auprès de vos clients partout dans le monde, avec une installation locale de COMSOL Server™.

N'attendez plus. Bénéficiez de la puissance des simulations multiphysiques.
comsol.fr/products

© Copyright 2017 COMSOL. COMSOL, the COMSOL logo, COMSOL Multiphysics, Capture the Concept, COMSOL Desktop, COMSOL Server, and LiveLink are either registered trademarks or trademarks of COMSOL AB. All other trademarks are the property of their respective owners, and COMSOL AB and its subsidiaries and products are not affiliated with, endorsed by, sponsored by, or supported by those trademark owners. For a list of such trademark owners, see www.comsol.com/trademarks.

COMSOL