POUR LA SCIENCE

ÉNERGIE
Photovoltaïque : vive les pérovskites !

PHYSIQUE
La solidité de la mousse liquide

CLIMATOLOGIE
Les révélations de l'Antarctique

POUR LA SCIENCE

Décembre 2015 - n° 458

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American



Comment l'Homme a conquis toute la planète

Le rôle clé de la coopération

M 02687 - 458 - F: 6,50 € - RD

Avec votre assurance vie GMF, prenez votre avenir financier en main.



Avec le contrat multisupports Multéo de GMF, vous pouvez doser la sécurité et opter pour la performance des marchés financiers. C'est vous qui déterminez les règles du jeu.

Trophée d'or •2015• des Contrats d'Assurance Vie
Le Revenu
MULTÉO
Catégorie *contrats multisupports actifs (2 à 15 fonds)*

Rendez-vous sur www.gmf.fr
ou appelez le

N° Vert 0 800 88 11 62
APPEL GRATUIT DEPUIS UN POSTE FIXE

GMF
ASSURÉMENT *Humain*

GMF VIE - Société anonyme au capital de 186 966 736 € entièrement versé - Entreprise régie par le Code des assurances - 315 814 806 R.C.S. Pontoise
Siège social : 1, rue Raoul Dautry - CS 40003 - 95122 Ermont Cedex - Tél. 0 970 809 809 (numéro non surtaxé). Internet : www.gmf.fr

POUR LA SCIENCE

www.pourlascience.fr

8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06

Groupe POUR LA SCIENCE
Directrice des rédactions : Cécile Lestienne

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

Dossier Pour la Science
Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin

Développement numérique : Philippe Ribeau-Gésippe

Directrice artistique : Céline Lapert
Maquette : Pauline Bilbault, Raphael Queruel, Ingrid Leroy
Correction et assistance administrative : Maud Bruguière et Anne-Rozenn Jouble
Marketing : Ophélie Maillet et Laurence Hay
Direction financière et direction du personnel : Marc Laumet
Fabrication : Marianne Sigogne et Olivier Lacam
Presse et communication : Susan Mackie
Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé
Anciens directeurs de la rédaction : Françoise Pétry et Philippe Boulanger
Conseiller scientifique : Hervé This
Ont également participé à ce numéro : Pierre Audebert, Antoine Chambert-Loir, Silvana Condemi, Anaïs Dréau, Sophie Gallé-Soas, Fernand Gobet, Laurent Jordan, Anne-Lise Lamy, Véronique Lazarus, Christophe Pichon, Daniel Tarquenet

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

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

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

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

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

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

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

OJD PRESSE PAYANTE Diffusion Certifiée 2014 www.ojd.com



Maurice Mashaal
rédacteur en chef

Migrations préhistoriques

Que nous rencontrions des membres de notre espèce dans tous les continents et la plupart des îles est un fait qui ne nous étonne guère aujourd'hui. Mais quand on apprend des paléoanthropologues qu'il y a environ 70 000 ans, des populations *Homo sapiens* ont quitté le berceau africain et essaimé très rapidement, on peut être saisi d'un vertige : comment, à des stades si reculés de notre histoire, des humains alors très peu nombreux ont-ils pu investir si vite d'aussi grands territoires et s'adapter à des milieux et climats si différents ? Pourquoi aucune autre espèce humaine, les Néandertaliens par exemple, n'a-t-elle réalisé un tel exploit ?

Les paléoanthropologues se posent depuis longtemps ces questions. Ils ont échafaudé diverses explications plus ou moins

La coopération même avec des individus non apparentés, un atout majeur

convaincantes, faisant intervenir la taille du cerveau, le climat ou des innovations techniques. Dans ce numéro, Curtis Marean nous expose sa théorie, qui attribue un rôle crucial à la coopération *(voir pages 26-35)*. Selon ce paléoanthropologue américain, est inscrite dans les gènes d'*Homo sapiens* une forte capacité à coopérer avec ses semblables, apparentés ou non. Et ce serait cet exceptionnel penchant à la coopération qui aurait permis à l'homme d'innover, notamment pour fabriquer des armes de jet efficaces, et ainsi de s'installer partout ou presque.

Des armes de jet… Pour chasser ? Bien sûr. Pour éliminer les autres espèces humaines présentes sur le chemin d'*Homo sapiens* ? Curtis Marean pense que oui. À en juger par l'histoire et au vu des mesquineries xénophobes face à l'afflux actuel de réfugiés du Proche-Orient, on est tenté de lui donner raison. Mais d'autres spécialistes ont des arguments pour une vision moins sombre des migrations préhistoriques *(voir page 34)*. Le pire n'est jamais sûr… ■

sommaire

3 Edito

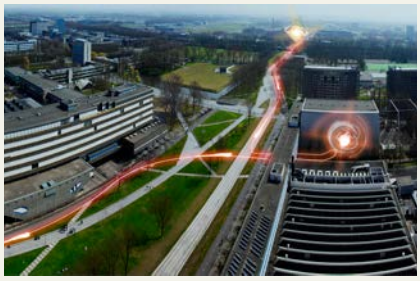
Actualités

5 La conjecture de la disc épance de Paul Erdős est désor ais prouvée

7 Il y a de l'or partout !

8 Les prix Nobel 2015

11 Une expérience de Bell sans faille

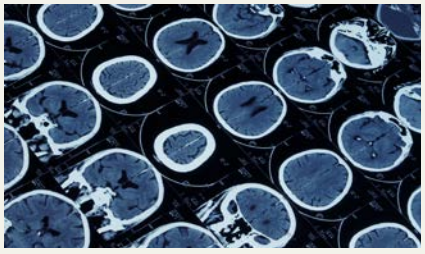


12 Palper virtuellement le cerveau

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

14 Éclairage
Human Brain Project : les raisons d'un échec
Stefan Theil



20 Homo sapiens informaticus
L'isoloir, plus démocratique que le vote électronique
Gilles Dowek

22 Cabinet de curiosités sociologiques
La guerre des intellectuels
Gérald Bronner

24 Lu sur SciLogs.fr
Teilhard de Chardin : la bombe apostolique
Alexandre Moatti

À LA UNE

26 PALÉOANTHROPOLOGIE
Comment *Homo sapiens* a conquis la planète
Curtis Marean
La coopération et les armes de jet expliqueraient pourquoi, de toutes les espèces humaines ayant vécu sur Terre, la nôtre est la seule à avoir investi la planète entière.

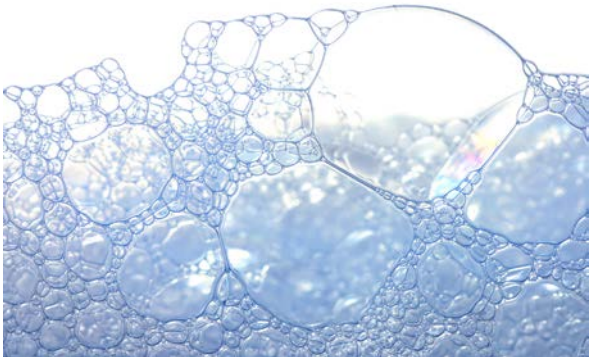


36 PSYCHOLOGIE
Pourquoi les bonnes idées tuent les meilleures
Merim Bilalić et Peter McLeod
Lorsque nous devons résoudre un problème, nous tendons à le faire par les moyens qui nous sont familiers. Cette attitude mentale nous empêche de voir les nouvelles solutions possibles qui, parfois, sont bien meilleures.

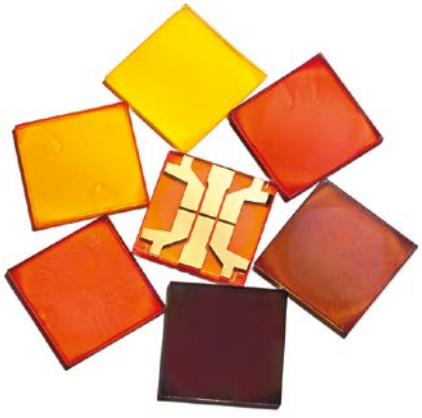
42 CLIMATOLOGIE
Mille ans de variations climatiques en Antarctique
Anaïs Orsi
En lisant dans la neige ancienne l'histoire du climat en Antarctique sur le dernier millénaire, les climatologues ont montré qu'il a subi plusieurs réchauffements, et que le dernier est de nature différente des précédents.



52 PHYSIQUE
La solidité de la mousse liquide
Ibrahim Cheddadi, Pierre Saramito et François Graner
À la fois liquides et solides, les mousses s'écoulent de façon bien mystérieuse pour les physiciens. Récemment, la compréhension de leur comportement a ouvert des horizons dans divers autres domaines.



60 ÉNERGIE
Photovoltaïque : le silicium éclipsé ?
Varun Sivaram, Samuel Stranks et Henry Snaith
Des matériaux récemment entrés en lice, les pérovskites, pourraient enfin mener à des cellules photovoltaïques moins coûteuses et de meilleur rendement que les cellules au silicium d'aujourd'hui.



70 HISTOIRE DES SCIENCES
Les Vilmorin, des botanistes d'exception
Christine Laurent
Pendant près de 200 ans, la famille Vilmorin a révolutionné le commerce scientifique des graines. Elle a aussi constitué un précieux herbier. Le fondateur de cette lignée de marchands botanistes était Philippe-Victoire de Vilmorin.

Rendez-vous

78 Logique & calcul
Faut-il interdire les robots tueurs autonomes ?
Jean-Paul Delahaye
Est-il possible de programmer un robot pour qu'il respecte des principes éthiques ? Les lois de la robotique qu'envisageait l'écrivain Isaac Asimov dès 1942 sont brûlantes d'actualité.

84 Science & fiction
Archéologues et paléontologues à la sauce Hollywood
J.-Sébastien Steyer et Roland Lehoucq

86 Art & science
Les Pieds nickelés et le mammouth
Loïc Mangin

89 Idées de physique
Tourbillonnantes tornades
Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

92 Question aux experts
Pourquoi repère-t-on son prénom au milieu des conversations ?
François Maquestiaux

94 Science & gastronomie
Généraliser le coulant au chocolat et le bâton royal
Hervé This

96 À lire

98 Bloc-notes
Les chroniques de Didier Nordon

Ce numéro comporte un encart d'abonnement *Pour la Science* situé en cahier intérieur de toute la diffusion kiosque et un encart *Philosophie Magazine* sur la diffusion abonné.
Les offres d'abonnement *Pour la Science* sont proposées en pages 76 et 93.
En couverture : © Pour la Science ; KieferPix/shutterstock.com

Toutes les archives
• Pour la Science
• Dossier Pour la Science
depuis 1996

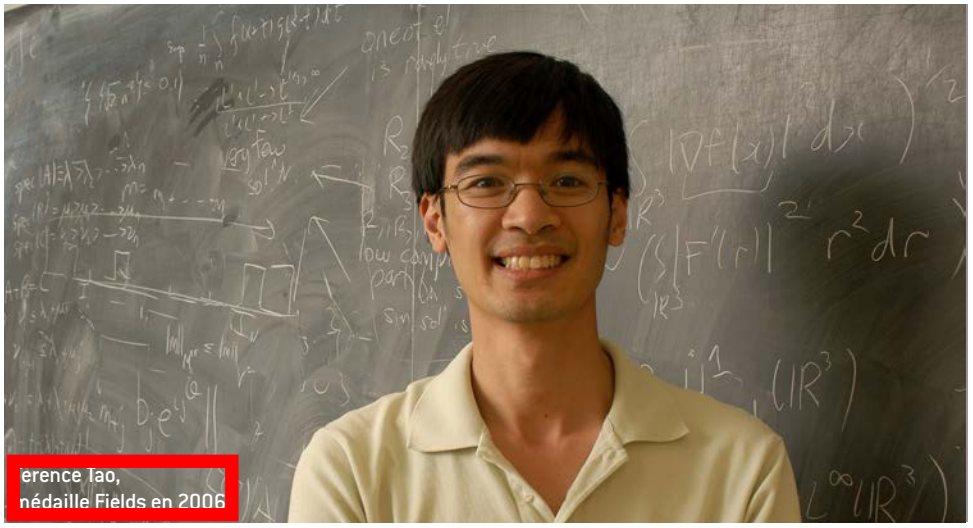

Disponibles sur www.pourlascience.fr*
* Numéros à lire en ligne ou à télécharger au format PDF

Actualités

Mathématiques

La conjecture de la discrépance de Paul Erdős est désormais prouvée

Cette conjecture résistait depuis plus de quatre-vingts ans. En s'appuyant sur les résultats d'un travail collaboratif et sur des découvertes récentes, l'Australien Terence Tao l'a confirmée



erence Tao, médaille Fields en 2006

En 1985, Terence Tao, jeune prodige des mathématiques âgé de 10 ans, rencontrait pour la première fois le célèbre mathématicien hongrois Paul Erdős, 72 ans. Ce dernier ne s'était pas trompé sur les qualités du garçon. Trente ans plus tard, Terence Tao, lauréat de la médaille Fields en 2006, a résolu l'une des conjectures énoncées par Erdős, la conjecture de la discrépance.

Le mathématicien et vulgarisateur James Grime illustre la conjecture ainsi : imaginez-vous sur une crête, avec un ravin à deux pas sur votre gauche et un autre à deux pas sur votre droite. Quels enchaînements de pas font que vous ne tombez pas dans un ravin ? Vous pouvez par exemple faire un pas à gauche, un à droite, un autre à gauche, encore un à droite, etc. Ou aussi un pas à droite, deux à gauche, un à droite, un à gauche, deux à droite, etc. Maintenant, pouvez-vous trouver un enchaînement de pas à gauche et à droite dont tous les sous-enchaînements – définis en prenant un pas sur deux, un pas sur trois, un pas sur quatre, etc. – vous évitent de tomber dans le ravin ? On voit bien que si l'on prend un pas sur deux du premier enchaînement précédent, on tombe très vite dans le ravin. En fait, on peut montrer qu'il est possible de construire un enchaînement de 11 pas sans qu'aucun des sous-enchaînements vous condamne à la chute. Mais avec 12 pas, la chute est inévitable. Et si les ravins sont plus éloignés, de quelle longueur sont les enchaînements de pas que l'on peut construire en respectant la règle énoncée ci-dessus ?

En langage mathématique, si l'on remplace les pas à gauche et à droite par 1 et –1, la question revient à construire une suite dont la valeur absolue de la somme des premiers termes soit toujours inférieure à un entier K fixé. Considérons maintenant des sous-suites en prenant des termes régulièrement espacés à partir de 0. On a d'abord la sous-suite des termes de rang pair, puis la sous-suite des termes de rang multiple de 3, puis multiple de 4, etc. Pour chacune de ces sous-suites, la valeur absolue de la somme des premiers termes peut-elle rester inférieure à K ? La conjecture d'Erdős énonce que c'est impossible pour K supérieur ou égal à 2. Pour toute suite, il existe toujours un nombre n et une sous-suite telle que la valeur absolue de la somme des n premiers termes excède K. L'énoncé de cette conjecture, dite de la discrépance, est relativement simple ; pourtant, des mathématiciens s'évertuent à la démontrer depuis quatre-vingts ans.

La situation $K = 2$ est illustrée plus haut par James Grime, avec des ravins situés à deux pas de chaque côté ; on a vu qu'on ne pouvait pas faire plus de 11 pas. Et pour $K = 3$? Boris Konev et Alexei Lisitsa, de l'université de Liverpool, en Grande-Bretagne, ont trouvé la solution en 2014. Grâce à un programme informatique, ils ont testé toutes les configurations possibles pour des enchaînements de plus en plus longs. La preuve occupe un volume de 13 gigaoctets, ce qui en fait la plus longue démonstration jamais proposée. Le résultat est qu'il est possible de construire des enchaînements de 1 160 pas et d'échapper à la chute, mais qu'il n'est pas possible de s'en sortir avec 1 161 pas.

Plus K est grand, plus la contrainte sur les enchaînements se relâche, et plus il est possible de trouver une longue suite. Il est assez clair que chaque valeur de K peut être étudiée selon la technique de Boris Konev et Alexei Lisitsa, mais cela ne suffit pas pour démontrer le cas général qui fait l'objet de l'énigme d'Erdős : pour toute suite, il existera toujours une sous-suite qui vous fera tomber dans le ravin situé à une distance arbitraire de K pas.

En 2009, Timothy Gowers, de l'université de Cambridge, en Grande-Bretagne, et lauréat de la médaille Fields en 1998, a intégré la conjecture de la discrépance d'Erdős au projet *Polymath*. Ce projet collaboratif rassemble de nombreux mathématiciens, dont Terence Tao, qui s'attaquent à certains problèmes bien définis.

En 2012, l'équipe a concédé qu'elle ne faisait plus de progrès. Néanmoins, un résultat important a émergé lors de cette collaboration mondiale qui a duré trois ans. Il a été montré qu'il suffisait de vérifier le cas d'un type particulier de suites de 1 et de –1 pour démontrer la conjecture de

façon générale : celles où le terme de rang $(n + m)$ est égal au produit des termes de rang n et de rang m, où n et m sont sans diviseurs communs. Ces suites sont intéressantes, car il existe des relations entre la suite principale et toutes les sous-suites. Ainsi, si la suite principale vous empêche de tomber dans le ravin (de dépasser le nombre K), il existe toute une liste de sous-suites qui vous empêchent de tomber dans le ravin.

Ces suites « multiplicatives » sont fréquentes en théorie des nombres. Elles apparaissent par exemple dans la fonction de Liouville qui est reliée aux nombres premiers. Elles ont été intensivement étudiées, mais certaines propriétés fondamentales restaient à éclaircir. En janvier 2015, un pas important a été franchi. Kaisa Matomäki, de l'université de Turku, en Finlande, et Maksym Radziwiłł, de l'université Rutgers, aux États-Unis, ont prouvé l'existence de relations surprenantes entre des moyennes à petite et grande échelle dans une suite multiplicative. Terence Tao a compris que ce résultat pouvait servir à prouver la conjecture d'Erdős, et l'a utilisé pour ce faire.

Ce résultat est extraordinaire à plus d'un titre. Il met en lumière le rôle des travaux collaboratifs tels que le projet *Polymath* dans de nombreux problèmes mathématiques. Il souligne aussi la performance d'un individu qui a pu trouver une démonstration générale alors que les ordinateurs, même les plus puissants, ne pouvaient vérifier que des cas particuliers.

Sean Bailly

T. Tao, soumis à Discrete Analysis, en ligne sur arXiv, 25 septembre 2015 http://arxiv.org/abs/1509.05363

Géologie

Il y a de l'or partout !

Saviez-vous que nous avons partout de l'or sous les pieds ? Le problème est que les roches n'en renferment qu'un milligramme par tonne en moyenne. Sauf dans les gisements, où le métal est jusqu'à mille fois plus concentré. Une équipe dirigée par Gleb Pokrovski, directeur de recherche CNRS au laboratoire Géosciences environnement Toulouse, a reconstitué leur formation et déduit qu'ils sont bien plus fréquents qu'on ne le croyait !

Où se trouvent les gisements d'or connus ?

Gleb Pokrovski : Un peu partout dans le monde, mais surtout dans les montagnes. Les gisements se forment en effet grâce à des fluides hydrothermaux, qui extraient l'or des roches de la croûte terrestre et le transportent jusqu'à un lieu où il précipite. Or ces fluides ne circulent que dans les zones géologiques assez actives, en général là où les plaques tectoniques se rencontrent, formant des montagnes et des volcans.

Pourquoi considérait-on la formation des gisements comme difficile ?

G. P. : L'or est un métal très inerte, qui se lie à peu d'espèces chimiques. De ce fait, il est difficile à extraire des roches. On ne connaissait que quelques éléments des fluides hydrothermaux capables de le dissoudre, tel l'ion chlorure Cl^-, et encore en faible quantité. Il fallait alors évoquer des hypothèses improbables pour expliquer les gisements : un volume de fluides hydrothermaux équivalent à celui des océans ou la présence de magmas ou de roches préconcentrés en or dans les profondeurs terrestres. Nous avons montré qu'un autre composé des fluides hydrothermaux, l'ion trisulfure S_3^-, est capable de transporter beaucoup plus d'or, ce qui rend ces hypothèses superflues.

Pourquoi cet ion était-il passé inaperçu jusqu'à présent ?

G. P. : Car dans les fluides hydrothermaux trouvés en surface, il se transforme en d'autres composés, en raison des plus faibles pressions et températures. Nous n'avons découvert sa présence dans les fluides profonds qu'en 2010, en reproduisant les conditions thermodynamiques des profondeurs (plusieurs centaines d'atmosphères et de degrés Celsius) dans des récipients de quelques dixièmes de millimètre de diamètre.



Gleb Pokrovski, directeur de recherche au CNRS.

Et comment avez-vous montré que cet ion se lie à l'or ?

G. P. : Grâce à la spectroscopie par rayons X, nous avons d'abord montré que des ions trisulfure entourent l'or dans des fluides modèles comprimés et chauffés. Nous avons ensuite simulé sur ordinateur les mouvements et les interactions d'une centaine de molécules dans les fluides hydrothermaux. Ces simulations ont confirmé que l'or se lie à l'ion trisulfure. Enfin, nous avons montré, par des mesures de solubilité et des calculs thermodynamiques, qu'un fluide hydrothermal riche en S_3^- est capable de dissoudre assez d'or pour former un gisement.

Vos travaux permettent-ils de localiser les gisements d'or ?

G. P. : Pas encore, car la formation de gisements dépend de nombreux autres paramètres : la roche doit être assez perméable pour que les fluides hydrothermaux s'y écoulent, l'or doit pouvoir précipiter, etc. On ne sait donc pas dire où exactement ces conditions se produisent. Mais la bonne nouvelle est que les gisements sont bien plus fréquents qu'on ne le pensait. Avec le processus que nous avons découvert, nul besoin d'invoquer des conditions ultraparticulières pour leur formation. Les ions trisulfure devraient dissoudre l'or un peu partout, même si les gisements qui affleurent sont concentrés dans les montagnes. On estimait auparavant que les gisements exploitables ne contenaient qu'un millionième de tout l'or de la croûte terrestre. Une estimation à revoir à la hausse.

Guillaume Jacquemont

G. S. Pokrovski et al., PNAS, en ligne le 12 octobre 2015

Chimie

Trois pionniers de la réparation de l'ADN

Tomas Lindahl, Paul Modrich et Aziz Sancar ont été récompensés pour la description de trois mécanismes moléculaires clés mis en œuvre dans la cellule pour réparer l'ADN

L'ADN, qui porte une bonne part du code génétique d'une cellule, n'est pas aussi stable qu'on pourrait le penser. Que ce soit de façon spontanée, sous l'effet d'une perturbation (rayonnement ultraviolet, radicaux libres…) ou durant la réplication de l'ADN lors de la division cellulaire, il s'y produit des mutations en permanence. En général, la cellule corrige ces erreurs et elles passent inaperçues. Les trois lauréats – Tomas Lindahl, de l'institut Francis Crick et du laboratoire Clare Hall, au Royaume-Uni, Paul Modrich, de l'institut médical Howard Hughes et de l'école de médecine de l'université Duke, aux États-Unis, et Aziz Sancar, de l'université de Caroline du Nord – ont chacun explicité un des mécanismes moléculaires qui permettent à la cellule d'effectuer ces corrections.

L'histoire a probablement commencé à la fin des années 1940, quand on s'est aperçu que les cellules étaient capables de se réparer. Albert Kelner, aux États-Unis, étudiait comment les bactéries réagissaient à une exposition aux ultraviolets (on savait déjà que les ultraviolets peuvent tuer les cellules). Il observa que les ultraviolets interrompaient leur croissance, mais que la lumière visible la relançait. Il existait donc un mécanisme qui, activé par la lumière, réparait les cellules endommagées.

Les biologistes ont peu à peu compris que tout se passait au niveau de l'ADN – les dégâts dus aux ultraviolets et les réparations photo-activées – et que la lumière réparatrice devait modifier l'ADN en activant une réaction enzymatique. Dans les années 1960, notamment, on perçoit que les réparations se font par suppression des constituants endommagés de l'ADN – on les nommera plus tard réparations par excision de nucléotides.

En 1966, chez la bactérie, trois gènes sont identifiés qui, lorsqu'ils sont défectueux, empêchent les cellules de se réparer après une exposition aux ultraviolets. Reste à savoir comment ils fonctionnent. Dans les années 1970, Aziz Sancar met au point une technique qui lui permet d'identifier les protéines codées par ces trois gènes et leurs fonctions. Le mécanisme qu'il explicite en 1983 est bien une histoire d'excision : les enzymes repèrent la région endommagée, la coupent et l'éliminent, tandis qu'une autre enzyme vient réécrire la partie manquante de l'ADN.

Entre-temps, au début des années 1970, Tomas Lindahl a ajouté une pierre à l'édifice. Il a montré que même sans ultraviolets, même sans agression extérieure, l'ADN n'est pas stable et se modifie. Spontanément, diverses réactions peuvent s'y produire : oxydation, méthylation, désamination… Ces réactions perturbent les constituants de l'ADN – les nucléotides et, plus spécifiquement, les bases A, T, G, C qui en forment le noyau dur et les distinguent les uns des autres –, ce qui augmente le risque de mutation. Tomas Lindahl a même identifié un mécanisme fréquent dans les cellules, qui conduit d'une de ces réactions à une mutation de l'ADN. Or cette mutation n'est pas quelconque : une base C se transforme en une base… U, pourtant absente du code de l'ADN. Cela signifie donc que la cellule corrige cette erreur. Tomas Lindahl se convainc lui aussi que le mécanisme en jeu dans ce type de réparation est une réaction enzymatique.

Les découvertes s'enchaînent alors. En 1974, il découvre une première enzyme chez les bactéries, puis toute une famille qui orchestre ce qui devient le mécanisme de réparation par excision de base. Il reconstitue le mécanisme chez la bactérie, puis dans les cellules humaines. Celui-ci ressemble à une chaîne de production : une enzyme détecte une base endommagée et désenroule l'ADN à cet endroit, ce qui éjecte la base. Une autre enzyme coupe l'ADN à l'endroit mutilé, et une troisième vient nettoyer le trou et le combler. Une quatrième soigne l'assemblage et aide la troisième à quitter les lieux.

Parallèlement, au cours des années 1970, les biologistes comprennent aussi que même pendant la réplication de l'ADN, lors de la division cellulaire, des erreurs de copie se produisent et sont corrigées, par un mécanisme que l'on nomme réparation des mésappariements. Paul Modrich explicite le mécanisme dans les années 1980 grâce à un test *in vitro*, hors des cellules, qu'il a mis au point.

La machinerie comporte elle aussi plusieurs enzymes : l'une d'elles repère l'erreur sur l'ADN et s'y lie, une autre lui indique sur quel brin d'ADN se trouve le problème (lorsqu'il se réplique, l'ADN forme deux brins enlacés – le brin répliqué et sa réplique –, et seule la réplique porte l'erreur), d'autres encore coupent le brin, l'écartent et le « réécrivent » correctement…

Toutes ces découvertes faites chez les bactéries ont depuis eu leurs pendants dans les cellules de mammifères. Elles ont mis en évidence la multiplicité des mécanismes en œuvre dans les cellules pour réparer l'ADN et ont notamment permis de mieux comprendre le lien entre plusieurs maladies, telles que certaines formes héréditaires de cancer colorectal, et des mutations sur des enzymes clés pour ces mécanismes.



La cellule corrige en permanence les erreurs apparaissant sur l'ADN, tel ce nucléotide anormal.

Marie-Neige Cordonnier

http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2015/



Un anophèle, vecteur du parasite du paludisme.

Médecine

La lutte contre les maladies parasitaires récompensée

Les lauréats du prix Nobel de médecine ont découvert des traitements contre les filarioses, dues à des vers nématodes, et le paludisme, ces affections étant parmi les plus dévastatrices. La parasitologie est enfin honorée.

Le prix Nobel de médecine 2015 a été décerné d'une part à l'Irlandais William Campbell (université Drew à Madison, aux États-Unis) et au Japonais Satoshi Ōmura (université Kitasato, au Japon), d'autre part à la Chinoise Youyou Tu (Académie chinoise de médecine traditionnelle).

Les deux premiers ont découvert un nouveau type de médicament, l'avermectine et ses dérivés, actifs contre l'onchocercose (ou cécité des rivières), due au ver nématode *Onchocerca volvulus*, un membre du groupe des filaires. Cette affection touche 37 millions d'individus, surtout en Afrique, mais aussi en Amérique centrale, là où vivent les insectes vecteurs, des diptères du groupe des Simuliidés, notamment l'espèce *Simulium damnosum*.

Le microbiologiste Satoshi Ōmura s'intéresse depuis longtemps aux *Streptomyces*, un groupe de bactéries du sol connues pour produire de nombreux composés antimicrobiens, par exemple la streptomycine. Le Japonais a réussi à isoler plusieurs souches bactériennes et à les cultiver en laboratoire.

Le parasitologue William Campbell a ensuite montré qu'une substance produite par ces bactéries était efficace contre des parasites d'animaux domestiques. Le produit en question, l'avermectine, a alors été amélioré chimiquement en un nouveau composé, l'ivermectine. Testée chez des humains, cette substance s'est révélée active contre les larves des parasites de l'onchocercose. Elle est aussi efficace contre d'autres filarioses. Toutefois, des indices laissent présager l'apparition de souches résistantes. L'espoir viendra peut-être de la moxidectine, un composé plus performant en cours de test.

Le paludisme est une autre parasitose très répandue : on compte quelque 200 millions de malades dans le monde et environ 600 000 décès chaque année. Cette fois, l'agent est un parasite unicellulaire du genre *Plasmodium* transmis par les moustiques anophèles.

Youyou Tu a identifié un nouveau composé efficace et à même de remplacer les molécules (la chloroquine et la quinine) devenues obsolètes. Elle a passé au crible les herbes traditionnelles utilisées en Chine contre le paludisme et a repéré un bon candidat, un extrait de l'armoise annuelle, *Artemisia annua*. Le principe actif – l'artémisinine – a ensuite été isolé et son efficacité prouvée. L'artémisinine et ses dérivés sont aujourd'hui prescrits dans le cas de thérapies combinées à base d'artémisinine (ACT) qui consistent à associer la molécule d'origine végétale à un composé qui potentialise la première et freine l'apparition de résistances. Les ACT sont les seuls traitements contre le paludisme recommandés par l'OMS.

Loïc Mangin

www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/2015/

Physique

Les neutrinos de nouveau à l'honneur

Takaaki Kajita et Arthur McDonald se partagent le prix Nobel de physique pour leur rôle dans la mise en évidence expérimentale de l'oscillation des neutrinos

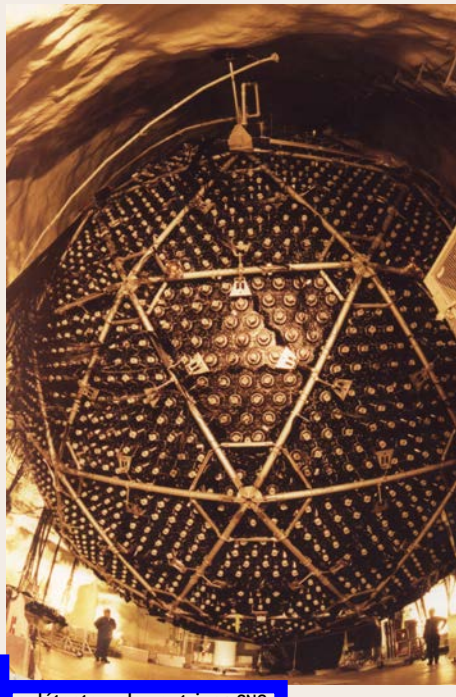
Prédits en 1930 par Wolfgang Pauli, les neutrinos n'ont été observés pour la première fois qu'en 1956. Ces particules interagissent très faiblement avec la matière, ce qui les rend difficiles à détecter. Des détecteurs gigantesques sont nécessaires.

On a mesuré les propriétés de ces particules à l'aide de nombreuses expériences. Par exemple, les physiciens pensaient que les neutrinos avaient une masse nulle, comme les photons. Mais rien n'excluait que leur masse soit non nulle, mais très petite. Comment le vérifier ? Une masse non nulle autorisait, en théorie, un phénomène nommé oscillation des neutrinos. Il existe trois types – ou « saveurs » – de neutrinos : le premier est associé à l'électron ; on le qualifie de neutrino électronique. Les deux autres, le neutrino muonique et le neutrino tauique, sont associés aux versions plus lourdes et instables de l'électron, le muon et le tau. L'oscillation signifie qu'un neutrino peut changer de saveur spontanément.

Le Japonais Takaaki Kajita et le Canadien Arthur McDonald sont récompensés pour leur contribution majeure aux expériences *Super-Kamiokande*, au Japon, et SNO *(Sudbury Neutrino Observatory)*, au Canada, qui ont confirmé le phénomène d'oscillation des neutrinos. Avec leurs équipes, ils ont ainsi démontré que ces particules ont une masse.

S. B.

www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2015/



Le détecteur de neutrinos SNO, au Canada.

Le dilemme du mouton

Dans un champ, les moutons ont des comportements collectifs qui alternent entre des phases où les ovins se dispersent lentement et d'autres où ils se regroupent très vite. Francesco Ginelli, de l'université d'Aberdeen en Écosse, et ses collègues ont modélisé la dynamique des moutons. Ils montrent que l'animal imite ses voisins, ce qui conduit à un équilibre entre le besoin de maximiser l'espace exploré pour trouver de la nourriture et la volonté de rester en contact avec ses congénères pour bénéficier de la protection du troupeau en cas de menace.

Nos ancêtres dormaient peu

Nos ancêtres africains dormaient-ils bien plus que nous ? Il semble que non, selon l'équipe de Jerome Siegel, de l'université de Californie à Los Angeles, qui a étudié trois sociétés préindustrielles résidant à des latitudes tropicales en Afrique ou en Amérique. Ces populations, dont les chercheurs estiment le rythme de sommeil proche de celui de nos ancêtres, se couchent plus de trois heures après le soleil, dorment un peu moins de six heures et demie par nuit et font assez peu de siestes. Reste que dans nos sociétés, de multiples études pointent un manque de sommeil néfaste.

Une naine blanche affamée

De nombreuses étoiles terminent leur vie sous la forme de naine blanche. Contrairement à ce qu'on pensait, l'atmosphère de certaines naines blanches est riche en éléments lourds. Andrew Vanderburg, du centre d'astrophysique Harvard-Smithsonian, et ses collègues ont confirmé l'explication la plus probable : grâce au télescope spatial *Kepler*, ils ont découvert des petites planètes laissant une traînée de débris autour de la naine blanche WD 1145+017. Cet astre se nourrit de ces débris et s'enrichit ainsi en éléments lourds.

Climatologie

Volcans et climat global : un impact mieux simulé

Les cernes des arbres sont une précieuse mémoire du climat. On peut par exemple y lire les variations de température ou de pluviométrie d'une année à l'autre. L'étude de ces anneaux de croissance – la dendrochronologie – permet ainsi d'estimer la baisse de température à l'échelle du globe qui accompagne des éruptions volcaniques massives, telles celles du Samalas en 1257 et du Tambora en 1815 (les plus importantes depuis 1500 ans, toutes deux en Indonésie). Cependant, les données dendrochronologiques et les simulations numériques livrent des résultats quantitatifs différents.

Une équipe menée par Markus Stoffel, de l'université de Genève, a affiné l'analyse des cernes. Jusqu'à présent, les spécialistes s'appuyaient sur l'épaisseur annuelle des cernes, mais l'équipe de Markus Stoffel a montré que la partie sombre (le bois tardif fabriqué au cours de l'été) est plus sensible aux variations exceptionnelles des conditions climatiques.



En 1991, l'éruption du Pinatubo a entraîné une baisse de température moyenne d'environ 0,4 °C.

Les chercheurs ont reconstruit un registre corrigé de la température estivale de ces 1500 dernières années. Les éruptions volcaniques y sont clairement décelables, corrélées à des baisses de température.

Parallèlement, l'équipe de Myriam Khodri, de l'institut Pierre-Simon-Laplace, a précisé les simulations en intégrant un modèle physique détaillé qui décrit le cycle d'évolution des aérosols, de leur formation lors de l'éruption jusqu'à leur sédimentation. Sans ces améliorations, les simulations surestimaient la baisse des températures.

Les deux équipes ont montré un bon accord quantitatif entre les deux méthodes.

S. B.

Nature Geoscience, en ligne le 31 août 2015

Insolite

Un utérus moderne de 48 millions d'années

Une jument gestante fossilisée il y a 48 millions d'années prouve que l'utérus mammifère était alors déjà proche de sa configuration actuelle. En grande partie conservé, l'appareil reproducteur de cette jument mise au jour sur le site allemand de Messel consiste en une masse sombre enfermant le fœtus (*allongé*), qui dessine l'utérus. Son examen indique que le système de reproduction des mammifères a évolué bien plus tôt qu'on ne le soupçonnait, probablement à l'époque où les mammifères couraient encore entre les pattes des dinosaures.



10 centimètres

Physique



Vue d'ensemble de l'expérience. Les deux diamants fournissant des systèmes intriqués sont situés dans des locaux distants *(taches jaunes, à gauche et en haut à droite)*.

Une expérience de Bell sans faille

L'existence de l'intrication et de la non-localité quantiques a été testée de nombreuses fois. Mais jusqu'à présent, tous les dispositifs souffraient de failles subtiles. Une nouvelle expérience évite ces écueils.

Albert Einstein est connu pour avoir émis de nombreuses objections à la physique quantique, en particulier à une de ses prédictions, l'intrication quantique. En 1935, avec Boris Podolsky et Nathan Rosen, il a formulé ses critiques sous la forme d'un paradoxe, le paradoxe EPR. Selon ces trois physiciens, l'intrication quantique de deux particules impliquait l'existence d'une interaction se propageant plus vite que la lumière. Pour éviter le conflit avec la théorie de la relativité restreinte, il faut alors supposer que la physique quantique décrit la réalité de façon incomplète et qu'il existe des variables cachées, inconnues des physiciens, qui donnent l'illusion de l'intrication quantique.

Le physicien danois Niels Bohr, lui, ne pensait pas qu'il y avait conflit avec la relativité restreinte. Selon lui, l'intrication quantique est un phénomène non local : il ne dépend pas des positions des particules dans l'espace. Un système intriqué forme un tout dont on ne peut pas décrire séparément les composants.

Des expériences ont été conçues pour confirmer la non-localité de l'intrication, mais toutes présentent des failles, ou échappatoires. Une équipe menée par Ronald Hanson, de l'université de Delft, aux Pays-Bas, a conçu une nouvelle expérience sans faille.

L'intrication quantique lie l'état de deux particules ou plus, même si elles sont très éloignées les unes des autres. Prenons un système intriqué de deux particules dont les spins (leurs moments cinétiques intrinsèques) sont toujours opposés. Lorsqu'on mesure le spin d'une des particules, le résultat est aléatoire (une orientation ou l'autre). Mais instantanément, le spin de la seconde particule prend l'orientation opposée, même si les particules sont trop éloignées l'une de l'autre pour avoir le temps d'échanger une information (à la vitesse de la lumière au plus).

Le débat lancé par Einstein et Bohr a peu évolué jusqu'en 1964, lorsque le physicien nord-irlandais John Bell propose un principe d'expérience pour trancher la question. Il établit des inégalités, dites de Bell, qui sont évaluées au cours de l'expérience. Si les inégalités sont violées, alors l'hypothèse des variables cachées sera exclue ; il faudra se résoudre à admettre le caractère non local de la nature.

En 1982, l'équipe d'Alain Aspect, de l'Institut d'optique à Orsay, met au point une expérience pour vérifier les inégalités de Bell. Elle fait appel à une source de paires de photons intriqués dont on mesure la polarisation avec deux instruments assez éloignés l'un de l'autre pour éviter l'« échappatoire de communication » (ou échappatoire de localité), c'est-à-dire une communication à la vitesse de la lumière entre les photons intriqués.

L'équipe d'Alain Aspect a montré que les inégalités de Bell sont violées, ce qui confirmait le caractère non local de la physique quantique. Cependant, cette conclusion nécessite de faire une hypothèse, car cette expérience souffre d'une « échappatoire de détection ». En effet, les photons sont facilement absorbés et tous ne sont pas détectés. On peut imaginer que les photons détectés violent artificiellement les inégalités de Bell, ce qui ne serait pas le cas de l'ensemble des photons. Pour que l'expérience d'Alain Aspect soit concluante, il faut supposer que l'échantillon constitué par les photons intriqués détectés est représentatif.

Ronald Hanson et son équipe ont mis au point un système qui traite les deux failles en même temps. L'idée avait déjà été suggérée par Bell. Il faut un sous-système qui assure que le dispositif quantique est prêt à être mesuré.

L'expérience comprend deux diamants – distants de près de 1,3 kilomètre –, qui présentent des défauts dans le réseau cristallin. Ces défauts constituent des systèmes quantiques individuels dotés chacun d'un spin électronique. Les physiciens forcent les diamants à émettre des photons intriqués avec l'état de spin du défaut. Ces photons sont guidés vers un dispositif placé entre les deux sites initiaux afin d'être détectés. La mesure de ces photons transforme (instantanément) leur intrication avec les spins des défauts en une intrication entre ces spins et assure que cette nouvelle intrication est prête à être mesurée. L'échappatoire de détection est fermée dans l'expérience, car les spins sont mesurés à chaque fois. Ces mesures sont effectuées en moins de 4 microsecondes pour empêcher l'échappatoire de communication. Les physiciens ont étudié 245 paires de spins de défauts dans cette expérience et ont alors montré que les inégalités de Bell étaient violées. La physique quantique est bien non locale.

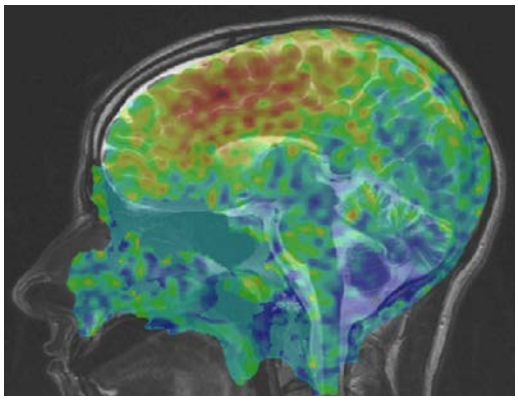
S. B.

Nature, en ligne le 21 octobre 2015

Neurosciences

Palper virtuellement le cerveau

Une nouvelle méthode d'imagerie se révèle capable de localiser des zones plus ou moins dures dans le cerveau. Elle pourrait être utile pour détecter des tumeurs ou les maladies neurodégénératives, telles que la maladie d'Alzheimer.



En mesurant les vibrations naturelles du cerveau par IRM et en déterminant leurs longueurs d'onde *(croissantes du bleu au rouge)*, les chercheurs calculent l'élasticité des tissus, susceptible de trahir la présence de certaines maladies.



Est-ce le début de la sismologie cérébrale ? C'est en tout cas des techniques des sismologues que s'est inspirée l'équipe de Stefan Catheline, de l'Inserm, pour élaborer une nouvelle méthode d'imagerie, qui vise à mesurer les variations d'élasticité dans le cerveau.

Ces informations, habituellement recueillies par palpation dans les autres régions du corps, sont précieuses pour le diagnostic de diverses maladies. La palpation permet par exemple de repérer les zones plus dures qui correspondent à des tumeurs. Depuis le début des années 2000, des méthodes virtuelles sont disponibles. Le principe est de créer une petite vibration à la surface de la peau et d'analyser sa propagation par des techniques d'imagerie. On remonte ainsi aux propriétés mécaniques des différents tissus.

Ces méthodes sont cependant difficiles à appliquer au cerveau, isolé de l'extérieur par le crâne et le liquide céphalorachidien. On y parvient tout de même, mais avec une faible précision et au prix de vibrations assez fortes, qui véhiculent une grande énergie acoustique. De ce fait, la technique n'est pas utilisée pour des examens cliniques de routine.

Les chercheurs se sont alors inspirés des sismologues, qui savent depuis peu reconstruire les propriétés des profondeurs terrestres en analysant le bruit sismique. Ce dernier résulte des innombrables sources qui font faiblement vibrer le sol, tel le choc des vagues sur la côte. Le cerveau aussi est agité d'un bruit sismique, car la pulsation du sang dans les artères et la circulation du liquide céphalorachidien y créent de multiples vibrations.

Les auteurs de l'étude ont partiellement reconstitué ces vibrations en prenant une image de l'intérieur du cerveau toutes les secondes et demie, grâce à l'imagerie par résonance magnétique (IRM). Ils ont ensuite calculé l'élasticité des zones traversées par les « ondes sismiques cérébrales » grâce aux algorithmes utilisés en sismologie.

Les chercheurs ont d'abord validé leur méthode sur un matériau d'élasticité connue, puis chez deux volontaires humains. À quelques exceptions près, ils ont obtenu des valeurs en accord avec les techniques fondées sur les vibreurs. Cependant, de nombreux essais précliniques et cliniques sont encore nécessaires pour prouver l'efficacité de la méthode.

Selon Stefan Catheline, la résolution est déjà suffisante pour le diagnostic de diverses maladies. « La maladie d'Alzheimer, la sclérose en plaques et les tumeurs impliquent des changements dans la dureté des tissus cérébraux », explique-t-il. Les caractéristiques de ces changements restent à préciser, car peu d'études ont mesuré ce paramètre dans le cerveau, mais les « vibrations inexploitées qui remplissent les tissus vivants », selon les termes des chercheurs, sont déjà pleines de promesses.

G. J.

A. Zorgani et al., PNAS, en ligne le 5 octobre 2015

1 millimètre

est l'amplitude maximale des vibrations naturelles créées par la circulation du sang et du liquide céphalorachidien dans le cerveau

Actualités

Astrophysique

Tchouri, deux corps en un

En juillet 2014, les images de la caméra OSIRIS de la sonde *Rosetta* ont révélé la forme en deux lobes de la comète Tchouri, avec une « tête » et un « corps » reliés par un mince cou. Quelle est l'origine de cette structure étonnante ? Deux scénarios ont été avancés : la fusion de deux objets ou l'érosion par dégazage au niveau du cou.

Les astrophysiciens ont étudié 103 zones plates ressemblant à des terrasses sur les deux lobes. Ces structures suggèrent que le noyau de la comète est constitué de strates, comme un oignon. En construisant un modèle en trois dimensions indiquant l'inclinaison des plans, les chercheurs ont montré que la comète est un assemblage de deux systèmes de stratification, chacun centré sur l'un des deux lobes. Tchouri est donc née de la fusion de deux corps cométaires.

S. B

M. Massironi et al., Nature, en ligne le 28 septembre 2015

Préhistoire

Le cousin africain des Sardes

L'équipe d'Andrea Manica, de l'université de Cambridge, a séquencé le tout premier génome africain fossile : celui d'un chasseur-cueilleur enterré dans la grotte éthiopienne de Mota il y a 4 500 ans. Très proche du génome des Ari, un peuple local, il contient aussi 4 à 7 % de gènes absents chez tous les Subsahariens. Il s'avère que ces gènes coïncident presque avec ceux des Sardes actuels, que l'on sait hérités directement de ceux des premiers paysans en Europe, originaires du Proche-Orient.

Comme les Sardes, le chasseur de Mota descend donc des premiers agriculteurs proche-orientaux, qui ont investi l'Europe il a quelque 7 500 ans. Cette constatation rejoint les résultats, publiés en 2014, du Projet d'étude des variations du génome africain auquel participe Andrea Manica. Ses chercheurs avaient été très surpris de constater que les génomes de 1 481 Subsahariens provenant de 18 groupes ethnolinguistiques différents conduisaient à inférer l'existence, il y a plus de 7 500 ans, d'un flux de gènes entre Eurasie et Afrique. Cet héritage génique des premiers paysans proche-orientaux est aujourd'hui commun aux Européens et aux Africains subsahariens.

François Savatier

M. Gallego Llorente et al., Science, en ligne le 8 octobre 2015

Géophysique

Comment se forment les orgues de basalte

En Irlande du Nord, les touristes ne manquent pas d'aller voir la Chaussée des Géants. Cet orgue basaltique avec ses 40 000 colonnes hexagonales, est le fruit du refroidissement d'une ancienne coulée de lave. Martin Hofmann, de l'université technique de Dresde, en Allemagne, et ses collègues ont modélisé la formation de tels motifs hexagonaux.

Lorsque de la lave se refroidit ou de la boue sèche, la partie supérieure se contracte et se fissure, ce qui libère de l'énergie liée à la tension mécanique. Ces failles sont disposées, *a priori*, de façon aléatoire. Cependant, comme elles libèrent surtout la tension perpendiculaire à leur direction, elles se connectent en général à angle droit : on parle de jonction T.

Dans des milieux qui sont asséchés ou gelés périodiquement, on observe que les jonctions T se déforment et se déplacent, ce qui les transforme en jonctions Y aux angles de 120°. Les motifs hexagonaux en résultent.

Dans le basalte, des jonctions T se forment en surface, mais la transition entre jonctions T et Y se produit en profondeur, alors que les fractures se propagent dans la lave se refroidissant.

Martin Hofmann et ses collègues ont calculé l'énergie libérée lorsqu'une fracture se propage. Ils ont supposé que la forme des jonctions pouvait changer. Ils montrent ainsi que si la jonction se déforme de T vers Y, l'énergie libérée augmente de 7 %. La tension dans le basalte est ainsi mieux dissipée et la configuration plus stable. Les chercheurs ont confirmé leur résultat avec des simulations numériques.

S. B

Phys. Rev. Lett., vol. 115, 154301, 2015



La Chaussée des géants, en Irlande du Nord, exhibe un spectaculaire orgue basaltique de quelque 40 000 colonnes hexagonales.

Des ultrasons pour absorber les médicaments

Certaines maladies du système digestif (inflammation chronique, maladie de Crohn, etc.) sont traitées avec des médicaments administrés lors de lavements. Or le médicament met parfois plusieurs heures à être absorbé. Pour accélérer le processus, Robert Langer, du MIT, et ses collègues ont utilisé des ultrasons. Ces ondes sonores créent un phénomène de cavitation transitoire : des bulles se forment et implosent dans le fluide porteur du médicament. Cela produit des microjets qui pénètrent plus facilement les tissus.

Gros comme un cerveau d'éléphant préhistorique

La recette pour évaluer la taille d'un cerveau d'éléphant préhistorique ? Classiquement, on retranche 20 % au volume de la boîte crânienne, pour tenir compte des tissus non cérébraux tels que les enveloppes protectrices. Toutefois, le paléontologue Julien Benoit, de l'université Montpellier 2, a montré que ce chiffre devrait plutôt être de l'ordre de 11 %. Pour ce faire, il a analysé plus de 600 spécimens de mammifères actuels, issus de 23 espèces, et en a déduit la différence moyenne entre le volume du crâne et celui du cerveau en fonction de la taille de l'animal. Les éléphants préhistoriques avaient donc un cerveau plus gros qu'on ne le pensait…

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

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

ÉCLAIRAGE

Human Brain Project : les raisons d'un échec

Deux ans après son lancement, doté de plus de un milliard d'euros, le projet de simulation du cerveau humain bat de l'aile. Est-ce dû à un problème de gestion ou a-t-on atteint les limites de la Big Science ?

Stefan Theil

Depuis des décennies, Henry Markram rêvait de modéliser le fonctionnement du cerveau humain. En 1994, postdoctorant à l'institut Max Planck pour la recherche médicale de Heidelberg, en Allemagne, il était devenu le premier scientifique à mesurer les signaux électriques entre deux neurones fraîchement prélevés sur un rat. Ces recherches avaient montré comment les synapses se renforcent ou s'affaiblissent, ce qui avait permis d'étudier et de modéliser les processus d'apprentissage du cerveau. Henry Markram avait ainsi acquis le statut d'expert scientifique au sein de l'institut Weizmann à Rehovot, en Israël, et en 1998, devenu professeur, il était l'un des chercheurs les plus respectés du domaine.

Puis la frustration est apparue. Malgré les dizaines de milliers d'articles publiés chaque année en neurosciences par des chercheurs du monde entier, ni la compréhension des fonctions fondamentales du cerveau ni les compétences en matière de traitement des troubles cérébraux ne semblaient progresser. La consternation de Henry Markram était aussi personnelle. Alors qu'il vivait encore en Allemagne, son fils Kai avait été diagnostiqué autiste. Et, comme il l'a raconté au *Guardian* en 2013, il voulait « pouvoir pénétrer le cerveau modélisé de [son] fils pour voir le monde comme celui-ci le percevait ». Le seul moyen d'y parvenir, pensait-il alors, était de modéliser les circuits de l'ensemble du cerveau humain.

En 2009, lors d'une conférence TED, il expose pour la première fois au grand public la manière dont, selon lui, on peut simuler sur un superordinateur les 86 milliards de neurones d'un cerveau et les 10^{12} synapses qui les connectent. « On peut y arriver en dix ans », promet-il, laissant entendre qu'un tel modèle mathématique pourrait même être doué de conscience. Les applications qu'il envisage sont nombreuses : découverte de nouveaux médicaments, substituts pour certaines expérimentations sur l'animal, étude de pathologies telles que la maladie d'Alzheimer. Sans compter l'élan que le projet donnerait à la technologie pour la construction d'ordinateurs plus performants et la création de robots dotés de compétences cognitives, voire d'intelligence.

Dérapage

Nombre de neuroscientifiques expriment leur scepticisme, mais Henry Markram bénéficie à l'époque de nombreux appuis. Sa vision semble être confortée en janvier 2013, quand l'Union européenne lui accorde 1,2 milliard d'euros répartis sur dix ans pour réaliser son objectif. Moins de deux ans plus tard, il règne sur le *Human Brain Project* (projet Cerveau humain) une grande confusion. Le projet est devenu un sujet de controverse, voire de dérision. Plusieurs scientifiques proches de Henry Markram le décrivent comme un génie qui aurait dérapé. Il perd sa fonction à la tête du projet et a l'obligation de ne plus parler à la presse. Selon le nouveau directeur général, Christoph Ebell, il n'assiste plus aux réunions internes du projet et délègue une personne pour échanger avec l'équipe de direction.

Le *Human Brain Project* a provoqué un schisme au sein de la communauté neuroscientifique européenne. En juillet 2014, une lettre ouverte attaquant le projet sur les plans scientifique et managérial recueille vite plus de 800 signatures dans le milieu de la recherche. En mars 2015, les signataires menacent de le boycotter. Henry Markram lance alors une médiation pour répondre à ses détracteurs. Un comité de 27 scientifiques examine les arguments des deux parties. Hormis deux personnes, le groupe est d'accord avec les critiques exprimées. Dans leur rapport, les médiateurs appellent à une refonte du projet, à la création d'une nouvelle structure de coordination et à un changement d'orientation scientifique. La réorganisation du projet est en cours.

La plupart des rapports sur les dérives de cet ambitieux projet pointent Henry Markram et son style de management, mais pas seulement. Tous s'accordent à dire que Henry Markram essaie de faire du bon travail scientifique. Et malgré les nombreux dysfonctionnements survenus au siège du projet, en Suisse, la principale source de problèmes se situerait à 500 kilomètres au nord, à Bruxelles. Là, au sein de la Commission européenne, le système

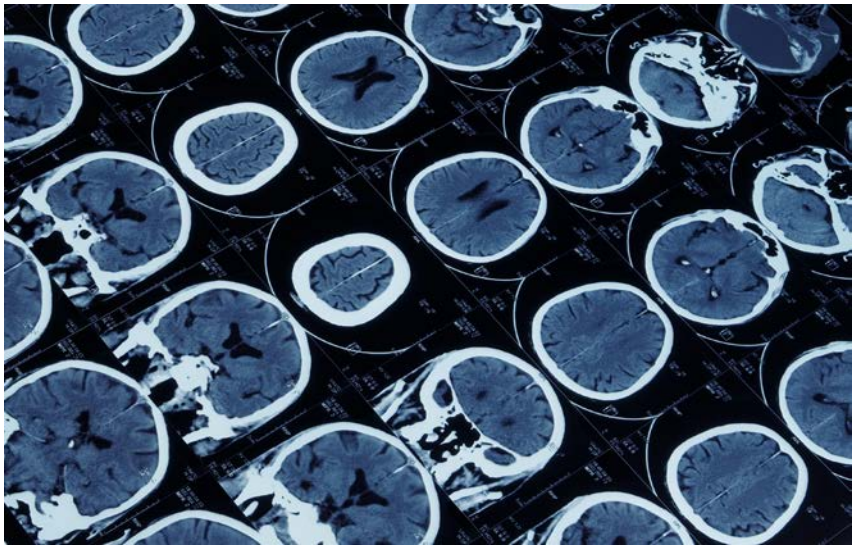
de financement des projets scientifiques à grande échelle – la Big Science – manque de transparence et le peu de contrôle exercé a favorisé l'énorme gabegie qu'est devenu le projet. « Le vrai problème n'est pas le *Human Brain Project*, mais le processus de prise de décision au sein de l'Union européenne », explique Andreas Herz, professeur de neurosciences computationnelles à l'université Louis-et-Maximilien de Munich, en Allemagne, et membre du comité de médiation.

Big Science, big questions

Depuis l'avènement de la Big Science, dans le sillage de la Seconde Guerre mondiale et du projet Manhattan, chercheurs et experts n'ont cessé de débattre de son bien-fondé. Dans un article paru en 1961, Alvin Weinberg, directeur du Laboratoire américain d'Oak Ridge, se demandait si les projets de grande envergure tels que les collisionneurs de particules ou les vols spatiaux habités ruinaient la science ou nous ruinaient. Il craignait que le spectaculaire prenne le pas sur la science et que les sommes engagées ne forcent les chercheurs avant tout à justifier leurs dépenses plutôt que leur raisonnement.

Les préoccupations sont les mêmes aujourd'hui, et aucun projet récent ne les a autant mises en exergue que le *Human Brain Project*. La Big Science porte sur des projets de recherche et développement collaboratifs, souvent interdisciplinaires, à grande échelle. Ils sont de plus en plus financés par des gouvernements du monde entier, soucieux de stimuler l'innovation.

Plusieurs raisons à cette prolifération. De nombreux domaines de recherche sont devenus si complexes et coûteux que les collaborations à grande échelle sont le meilleur moyen d'avancer. La Big Science est depuis longtemps la norme en physique des hautes énergies, où l'exploration des limites de la nature exige l'utilisation de gigantesques accélérateurs de particule, tel le LHC (Grand collisionneur de hadrons) au Cern, près de Genève. En biologie, les débuts de la Big Science datent des années 1990, avec le projet *Génome humain*. Concentré sur 13 ans, il a été cofinancé à hauteur de trois milliards



L'IMAGERIE PAR RÉSONANCE MAGNÉTIQUE nucléaire permet de visualiser l'activité de régions du cerveau. Le *Human Brain Project* a pour objectif de simuler les quelque 86 milliards de neurones du cerveau humain et leurs interactions.

de dollars par les Instituts de la santé et le département de l'Énergie américains, avec pour objectif d'établir le séquençage de l'ADN humain. Au début des années 2010 vient le tour des neurosciences. Presque en même temps que le projet européen, les États-Unis dévoilent l'initiative *BRAIN* (*Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies*). Israël, le Canada, l'Australie, la Nouvelle-Zélande, le Japon et la Chine annoncent eux aussi la mise en place d'importants programmes de recherche en la matière. Pour Tom Insel, directeur de l'Institut américain de santé mentale, l'une des entités gérant le projet *BRAIN*, ce sont à la fois l'inquiétude liée à l'extension et au coût des troubles mentaux, et l'enthousiasme suscité par les techniques de neuromanipulation – telle l'optogénétique –, qui ont galvanisé les responsables politiques et les scientifiques.

Pourtant, en montrant comment ce type de projet peut vite s'égarer, le *Human Brain Project* montre les limites de ces dépenses somptuaires à l'égard de problématiques complexes. Fructueuses quand elles s'appliquent à des objectifs technologiques bien définis, tels que la construction de fusées ou le décodage du génome, ces coûteuses initiatives gérées par un petit groupe de scientifiques et d'administrateurs sont-elles à même de développer un projet aussi fondamental que la compréhension du cerveau humain ?

Parmi les neuroscientifiques de la génération de Henry Markram (il a aujourd'hui 53 ans),

L'AUTEUR



Stefan THEIL est journaliste et éditeur basé à Berlin. Il est depuis peu résident du centre Joan Shorenstein à l'université Harvard, aux États-Unis.

peu rivalisent avec lui en termes d'accomplissement scientifique et d'ambition. En 2005, il a lancé le *Blue Brain Project*, auquel a contribué IBM en construisant le supercalculateur *Blue Gene* à l'École polytechnique fédérale de Lausanne. Le projet vise à simuler une petite région du cerveau d'un rat. Mais s'il fournit des connaissances sur la modélisation des circuits neuronaux, des critiques soulignent que ce type de modélisation n'améliore pas la compréhension du fonctionnement cérébral. Jusqu'en octobre dernier, Henry Markram n'a pas publié d'article scientifique exhaustif sur les résultats de *Blue Brain Project (un tel article est paru le 8 octobre, voir l'encadré page ci-contre)*. Pourtant, il s'est vite lancé dans un projet plus ambitieux encore : *Human Brain Project*.

Aux compétences scientifiques de Henry Markram s'ajoute une exceptionnelle force de persuasion. Charismatique et photogénique, il a acquis une réputation de visionnaire en neurosciences. Il a aussi toujours été prompt à balayer les critiques de ceux qui, selon lui, sont peu enclins à embrasser « la révolution conceptuelle » que représente le *Human Brain Project*. Nombre de ses détracteurs en contestent le fondement scientifique. La plupart des neuroscientifiques pensent que simuler le fonctionnement du cerveau avec la précision imaginée par Henry Markram n'apporterait rien en matière de cognition, de mémoire ou d'émotion – de même que copier atome par atome le matériel informatique d'un ordinateur nous dirait peu sur le logiciel qui fonctionne à l'intérieur. Les critiques accusent aussi Markram d'avoir surestimé les applications potentielles du projet.

Malgré le scepticisme de la communauté neuroscientifique, Henry Markram convainc les personnes qui comptent : les bailleurs de fonds au sein de la Commission européenne, qui semblent avoir moins examiné la faisabilité scientifique du projet que ses potentielles retombées économiques et politiques. En 2009, mue par la crainte d'être devancée outre-Atlantique en matière d'informatique, de numérique et d'autres technologies, la Commission européenne a lancé un concours pour des projets phares, avec à la clé au moins un milliard d'euros pour chacun. Visant tout autant la politique industrielle que les sciences, ces projets sont censés « permettre à l'Europe d'occuper une position de leader » dans le secteur des technologies émergentes. Avec ses promesses de retombées pour les neurosciences, la médecine, la robotique et la technologie numérique, le *Human Brain Project* correspond tout à fait aux aspirations d'une administration qui croit un tel projet réalisable en dix ans.

Parce que ce programme a été envisagé comme une vitrine, en dehors du processus habituel de financement des projets scientifiques, et parce qu'il fallait bien justifier un budget aussi colossal, les responsables politiques, les bureaucrates et même les scientifiques sont incités à exagérer ses promesses. Un jury secret de 25 experts (dont au moins un neuroscientifique) venus de toute l'Europe a ainsi choisi, parmi les six finalistes, deux projets, dont le *Human Brain Project*, chacun doté d'environ un milliard d'euros, versés par tranches de 100 millions.

L'autre vainqueur est le projet *Graphène* – selon lequel un consortium de chercheurs académiques et industriels de 23 pays doit développer les applications de ce nanomatériau prometteur dans les domaines de l'électronique, de l'énergie et dans d'autres secteurs industriels. Ce projet doit de plus aider l'industrie européenne à ne pas se laisser doubler par des pays asiatiques tels que la Corée du Sud, où Samsung travaille aussi sur ce matériau.

Cependant, contrairement au *Human Brain Project*, le projet *Graphène* n'a pas suscité de polémique et les acteurs de la recherche industrielle y ont vite souscrit partout en Europe. L'une des différences capitales réside dans le fait que le projet *Graphène* n'est pas fondé sur la vision d'une unique personne. Il a été élaboré de manière collaborative et décentralisée. Ainsi, tandis que Henry Markram et un petit groupe de personnes contrôlent la structure du *Human Brain Project* et son financement, le projet *Graphène* est un réseau ouvert, coordonné avec souplesse par le porteur du projet, l'université technologique Chalmers de Göteborg, en Suède. Peut-être plus important encore, le projet *Graphène* a un objectif technique bien défini : développer une technologie dédiée à la commercialisation d'un matériau éprouvé. Contrairement à la modélisation du cerveau, cet objectif ne nécessite pas de combler de vastes lacunes dans les fondements mêmes d'un domaine.

Le projet correspondait aux aspirations d'une administration qui croyait une telle entreprise réalisable en dix ans

« La médiation laisse espérer que la crise sera réversible »

À la suite des recommandations de la médiation sur le *Human Brain Project*, rendues en mars dernier, les nouvelles orientations du projet se précisent. Le point avec Yves Frégnac, professeur de sciences cognitives à l'École polytechnique, directeur de l'Unité neuroscience, information et complexité (UNIC) au CNRS et membre de la division Architecture cognitive du projet.

POUR LA SCIENCE
Le *Human Brain Project* a-t-il produit des résultats ?

YVES FREGNAC : Le *Human Brain Project* (HBP) a été présenté comme un projet nouveau et audacieux pour mieux comprendre et simuler le cerveau, soigner les maladies mentales et développer de nouvelles technologies de l'information. Il n'a pas encore à son actif de contributions majeures correspondant à son ambition initiale. Ce constat n'est pas inquiétant, après seulement deux ans de fonctionnement. Néanmoins, une avancée notable a eu lieu en octobre. Jusqu'à présent, il manquait au projet une « preuve de concept », démontrant la faisabilité de simuler de façon réaliste le fonctionnement du cerveau humain. Cette preuve vient de lui être fournie partiellement par le *Blue Brain Project*, lancé sept ans plus tôt.

Une équipe internationale dirigée par Henry Markram a simulé la structure et la fonction d'un tiers de millimètre cube du néocortex du rat nouveau-né. Le comportement électrique du tissu cérébral virtuel reconstruit (30 000 neurones connectés par près de 40 millions de synapses) a été simulé avec des superordinateurs approchant l'exaflop (10^{18} opérations par seconde). Ce premier pas vers une simulation du cerveau représente l'apogée de 20 ans d'expérimentations et 10 ans de calculs informatiques pour développer les algorithmes et construire l'écosystème logiciel nécessaire à la représentation complète d'une colonne corticale.

Ce tour de force technique ne répond cependant pas à toutes les interrogations. Par exemple, les simulations sont fondées sur des données chez le nouveau-né, à la différence d'autres projets utilisant comme référence la connectivité adulte. Pour de nombreux spécialistes de la plasticité synaptique, il paraît peu vraisemblable qu'une « photo » de la connectivité *in vitro* chez l'animal nouveau-né, aussi réaliste soit-elle, puisse rendre compte de la dynamique corticale observée *in vivo* chez l'adulte.

PLS
Quels sont les nouveaux objectifs du HBP ?

Y. F. : Au cours des premiers mois de son fonctionnement, un long débat a eu lieu dans la presse scientifique internationale concernant un changement de ses objectifs. Les dirigeants du projet affirment que, dès le départ, il est défini comme un ensemble d'infrastructures de type plateformes informatiques à haute performance et de calcul neuromorphique (inspiré du vivant). Pourtant, pour certains participants de la première heure et la plupart des chercheurs en neurosciences, l'objectif principal annoncé était la compréhension du fonctionnement du cerveau. Cet axe fondamentaliste a bel et bien disparu des objectifs réaffirmés du programme, au profit de la simulation à haute performance et des bases de données multi-omiques (les « big data », assemblant les données sur les neurones – transcriptome, protéome… – et leurs interactions – le connectome).

Les limitations qui découlent de la radicalisation technologique du projet ne sont pas à minorer, puisque simuler le cerveau ne signifie pas obligatoirement comprendre les mécanismes de la pensée et le code neuronal. Cependant, le remarquable travail de médiation, mené par Wolfgang Marquardt, a obligé le HBP à reconsidérer sa décision hâtive de dissoudre sa division de neurosciences cognitives et laisse espérer que la crise de confiance auprès de la communauté des neurosciences sera réversible. Déjà, le HBP a clarifié le statut des infrastructures, destinées à être mises au service de la communauté, et renforcé le financement de projets visant à utiliser les infrastructures pour faire émerger des fonctions cognitives. L'avenir nous dira si les neuroscientifiques européens viendront peupler les bases de données construites à leur intention et s'en serviront.

PLS
Est-ce réalisable ? En combien de temps ?

Y. F. : La date promise de la simulation complète du cerveau humain est 2023, mais cette date est arbitraire et correspond à la durée prévue du contrat (10 ans) ! Les spécialistes espèrent des progrès majeurs pendant cette période, mais envisagent que HBP survive sous la forme d'une ressource européenne pérenne (un futur « cérébroscope »). La promesse d'une date butoir affaiblit le sérieux de la démarche scientifique, car elle pousse chercheurs et responsables européens à affirmer une valeur ajoutée sociétale très au-delà de ce que l'état des connaissances sur le cerveau nous permet d'entrevoir.



Yves FREGNAC, directeur de recherche au CNRS.

PLS
Le projet a-t-il trouvé une réelle utilité à présent ?

Y. F. : Il me semble que tous les acteurs (chercheurs, institutions nationales, Europe) se trouvent maintenant face à leur responsabilité. Une action radicale reste nécessaire pour relancer la confiance et l'enthousiasme des communautés concernées. Elle ne pourra se faire, à mon avis, qu'en réduisant les conflits d'intérêt et en accueillant au sein du HBP les grands instituts de neurosciences théoriques (Gatsby, Bernstein) encore largement hostiles au projet. Leur participation est nécessaire pour unifier les théories du cerveau. L'ironie de cette crise est que le HBP, en promettant un investissement européen exceptionnel dans la recherche sur le cerveau humain, a stimulé la création d'initiatives à grande échelle en neurosciences aux États-Unis, en Chine et au Japon. Faut-il échouer ici pour réussir ailleurs ?

Propos recueillis par Marie-Neige CORDONNIER

Curieusement, la Commission européenne n'a pas insisté pour que soient effectués les contrôles de rigueur et les bilans d'usage sur la gestion du *Human Brain Project*, lors de son lancement en 2013. Selon le rapport de médiation, des conflits d'intérêt ont gangrené sa gouvernance. Non seulement Henry Markram et deux autres scientifiques contrôlaient le conseil d'administration, et donc la répartition des financements au sein du consortium de 112 institutions, mais le projet scientifique de Henry Markram et ceux de plusieurs autres membres du conseil d'administration ont été les bénéficiaires de leurs propres arbitrages financiers.

Ce n'est qu'à partir de la lettre ouverte de juillet 2014 que la Commission européenne commence à mentionner des problèmes de gouvernance. Quelques jours avant que les médiateurs ne communiquent leur rapport, elle publie son propre compte-rendu (rédigé par un comité dont les membres ne sont connus que de la Commission et du projet), bien moins explicite sur les problèmes de gouvernance, mais exigeant tout de même des changements. La Commission salue aussi le processus de médiation. Sans la fronde des neuroscientifiques, il n'est pas certain que les changements organisationnels actuels auraient été exigés.

La leçon de *BRAIN*

Jusqu'à présent, le projet américain *BRAIN* s'en est bien mieux sorti que le *Human Brain Project*. Dévoilé en avril 2013, il a d'abord lui aussi été accueilli avec scepticisme. De nombreux scientifiques américains ont craint que le projet siphonne les subventions destinées à la recherche en neurosciences pour des objectifs nébuleux, voire inatteignables. Mais au lieu de procéder dans le plus grand secret, à coups de comités restreints et de comptes-rendus confidentiels, l'Institut américain de la santé mentale a réagi en suspendant le projet et en impliquant les neuroscientifiques. L'agence a nommé un comité de 15 experts du cerveau et l'a laissé définir le projet dans une série de réunions de travail ouvertes au public. Une année de délibérations a permis d'établir un programme interdisciplinaire ambitieux visant à développer de nouveaux outils technologiques qui permettront de mieux enregistrer, mesurer et stimuler l'activité cérébrale.

La grande différence entre le *Human Brain Project* et le projet *BRAIN* est que ce dernier ne se fonde pas sur un point de vue scientifique unique. De nombreuses équipes y rivalisent pour obtenir des subventions et innover dans des directions différentes et imprévues. Cette compétition a lieu selon le processus d'évaluation classique de l'Institut américain de la santé mentale, par les pairs, qui empêche les conflits d'intérêt. Ce système n'est pas parfait – il tend à favoriser les paradigmes scientifiques connus – et le financement scientifique américain a aussi ses propres failles. Mais, plus concurrentiel et transparent, le processus de décision du projet *BRAIN* est bien loin de la boîte noire qui a produit le *Human Brain Project*.

Le projet *BRAIN* a de bonnes chances de réussir, car, malgré son étiquette de mégaprojet, il s'agit moins de Big Science que d'un modèle d'innovation distribuée au financement centralisé et doté de règles qui encouragent la collaboration. L'étiquette de mégaprojet n'est peut-être même qu'une astuce de marketing pour lever des fonds et trouver des soutiens.

Suite aux critiques formulées dans le rapport de médiation, le *Human Brain Project* est soumis à une profonde réorganisation. Selon Christoph Ebell, une nouvelle structure de gestion est en construction, qui évitera la concentration des pouvoirs. De nouveaux organes de contrôle indépendants seront mis en place. Un sous-projet clé de neurosciences cognitives, dont la suppression, l'an dernier, avait accéléré les attaques contre le *Human Brain Project*, a été rétabli. Le processus d'accès aux subventions du *Human Brain Project* est aussi repensé en une mise en concurrence plus ouverte des projets collaboratifs. Désormais, chaque groupe impliqué dans le consortium, y compris celui de Henry Markram, devra demander le renouvellement de ses subventions tous les deux ans.

Le *Human Brain Project* se focalise aussi davantage sur la production d'outils informatiques à visée plus large que la simulation du fonctionnement du cerveau : un ensemble de logiciels de traitement des données et de modèles mathématiques pour la recherche neurologique – ce que même ses détracteurs approuvent. En se concentrant ainsi sur la gestion des données – un aspect qui était déjà au cœur de la démarche de Henry Markram – le *Human Brain Project* pourrait devenir le complément parfait du projet *BRAIN*, dont les nouvelles technologies devraient générer de gigantesques volumes de données neurologiques. Si le *Human Brain Project* se recentre sur son socle technologique, Henry Markram pourrait bien, finalement, léguer aux neurosciences un patrimoine conséquent et durable. ■

BIBLIOGRAPHIE

H. Markram *et al.*, **Reconstruction and simulation of neocortical microcircuitry**, *Cell*, vol. 163, pp. 456-492, 2015.

M. Marquardt *et al.*, ***Human Brain Project* Mediation report**, mars 2015. En ligne : http://bit.ly/1M347KS

L. J. Huang et L. Luo, **It takes the world to understand the brain**, *Science*, vol. 350, pp. 42-44, 2015.

Y. Frégnac et G. Laurent, **Neuroscience : Where is the brain in the *Human Brain Project* ?**, *Nature*, vol. 513, pp. 27-29, 2014.

Groupe de travail de *BRAIN*, ***BRAIN* 2025 : A Scientific Vision**, NIH, 2014. En ligne : braininitiative.nih.gov/2025/

H. Markram, ***Human Brain Project* : simuler le cerveau humain**, *Pour la Science*, n° 425, pp. 36-42, mars 2013.

GRENOBLE SCIENCES

■ CONSEIL ■ EXPERTISE ■ LABELLISATION ■ ÉDITION

En 2014 et 2015, *Grenoble Sciences* a labellisé des ouvrages originaux pour des publics variés

Des ouvrages originaux de niveau LMD ou pour un public cultivé (Collection *Grenoble Sciences*, blanche et colorée)



À l'international, des livres « *Selected by Grenoble Sciences* » ainsi que d'autres titres en roumain, chinois…



Un ouvrage sur un thème intéressant avec des expertises variées



■ GRENOBLE SCIENCES

Retrouvez tous les titres sur notre site

www.grenoble-sciences.fr

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

Université Joseph Fourier GRENOBLE

Région RhôneAlpes

HOMO SAPIENS INFORMATICUS chronique de Gilles Dowek



L'isoloir, plus démocratique que le vote électronique

Quel système garantit les critères du vote démocratique, le secret du vote et la vérifiabilité du décompte des voix ?

Nous votons ce mois-ci et se pose donc une nouvelle fois la question du protocole de vote utilisé. Est-il, par exemple, opportun de remplacer le traditionnel vote à l'urne par le vote électronique, plus rapide et moins couteux ? Et, pour une fois, *Homo sapiens informaticus* et l'homme du XX^{e} siècle tombent d'accord pour préférer le vote à l'urne. Il a en effet été démontré en 2006 qu'il est impossible, pour un protocole de vote électronique, de concilier la vérifiabilité du décompte des voix et le secret du vote, deux propriétés pourtant l'une et l'autre essentielles à la démocratie. Un protocole garantissant l'une de ces propriétés le fait nécessairement au détriment de l'autre.

Que le vote électronique ne puisse égaler le vote à l'urne semble suggérer l'existence de phénomènes qui se déroulent dans le monde physique, mais qui ne peuvent pas être simulés avec un ordinateur – une idée que les informaticiens accueillent, en général, avec scepticisme. Le vote à l'urne serait-il donc un phénomène exceptionnel, impossible à simuler avec un ordinateur ou un réseau d'ordinateurs ?

En fait, ce n'est pas le cas. Le mouvement d'un bulletin de vote de l'isoloir jusqu'à l'urne, par exemple, est une banale transmission d'information, qui peut très facilement être simulée avec un réseau d'ordinateurs. Cependant, la matière obéissant à une loi de conservation, le mouvement du bulletin de vote en papier vers l'urne le fait automatiquement disparaître de l'isoloir. L'information, en revanche, n'obéit à aucune loi similaire et, lors de la transmission d'un bulletin virtuel sur un réseau d'ordinateurs, le bulletin est d'abord recopié dans l'urne virtuelle, avant d'être éventuellement détruit dans l'isoloir virtuel. Toutefois, cette destruction n'est nullement automatique et, surtout, elle n'est pas la conséquence de la copie du bulletin virtuel dans l'urne virtuelle : l'avènement d'un nouvel état du monde physique fait disparaître le précédent, alors que, lors d'un calcul, chaque état s'ajoute aux précédents.

Le problème ne vient donc pas de l'impossibilité de simuler le vote à l'urne avec un réseau d'ordinateurs, mais du fait que le vote à l'urne et sa simulation ont des propriétés différentes. La conservation de la matière empêche, par exemple, une fuite d'information, plus difficile à garantir dans le cas du vote électronique. Pour cette raison, le vote électronique est moins sûr que le vote à l'urne et remplacer le vote à l'urne par le vote électronique pour l'élection des conseils régionaux serait un recul de la démocratie.

Un protocole électronique ne peut concilier la vérifiabilité du décompte des voix et le secret du vote.

Cependant, la question de l'opportunité du remplacement du vote à l'urne par le vote électronique pour les élections régionales n'est pas la seule question qui se pose à nous et la manière dont nous la formulons est caractéristique de notre paresse intellectuelle, qui aborde toujours les interrogations nouvelles dans le contexte d'une situation ancienne. Une question, peut-être plus importante que celle du remplacement du vote à l'urne par le vote électronique pour les élections traditionnelles, est celle des nouvelles élections que la rapidité et le faible coût du vote électronique permettraient d'organiser. Aujourd'hui, en effet, de nombreuses décisions sont prises sans aucune consultation, ou avec des protocoles de consultation, telles les enquêtes d'utilité publique ou les sondages, moins fiables encore que le vote électronique. Il faut aussi prendre en compte le fait que si la vérifiabilité et le secret ne peuvent être assurés simultanément de façon absolue, ils deviennent compatibles sous des hypothèses relativement raisonnables, par exemple, l'existence de canaux privés ou physiques – tel l'envoi, par la poste, d'un élément d'authentification – ou l'honnêteté de certains agents. Utiliser le vote électronique pour prendre ces décisions serait donc, ainsi, un progrès de la démocratie.

Mais si un jour ces décisions deviennent essentielles à la vie de la démocratie, nous devrons nous poser la question du protocole de vote utilisé pour les prendre et, notamment, de l'opportunité de remplacer le vote électronique par le vote à l'urne. ■

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

LE MEILLEUR CHEMIN VERS LES ÉTOILES PASSE FORCÉMENT PAR

LA MAISON DE L'ASTRONOMIE

PROFITEZ DES FÊTES POUR VOUS PRÉPARER AU RAPPROCHEMENT MARTIEN DE 2016

OFFRES VALABLES DANS LA LIMITE DES STOCKS DISPONIBLES

TÉLESCOPE
Sky-Watcher MAK 102 AZ GT
Réf. 12152

~~489 €~~
439 €*



KIT OPTIQUE SPÉCIAL MARS
Réf. 16646

~~156 €~~
129 €

- 1 Oculaire 7 mm WA SP 31.75 mm
- 1 Oculaire 15 mm WA SP 31.75 mm
- 1 Filtre Planétaire Rouge 31.75 mm
- 1 Filtre Planétaire Bleu 31.75 mm
- 1 Éclairage Rouge Porte-Clés



* avec le code promo MARS025 sur notre site internet www.maison-astronomie.com

Offre valable du 1er novembre au 25 décembre 2015

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

33 et 35, rue de Rivoli, 75004 Paris
Tel. : 01 42 77 99 54
info@maison-astronomie.com

horaires d'ouverture
du mardi au samedi de 10h15 à 18h30

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

CABINET DE CURIOSITES SOCIOLOGIQUES par Gérald Bronner



La guerre des intellectuels

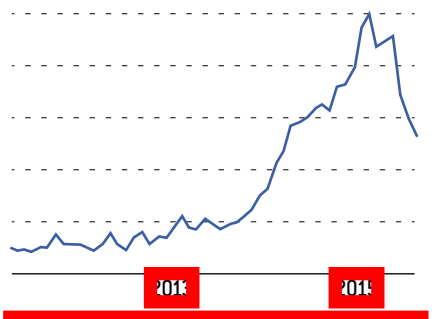
Les polémiques soulevées par les déclarations de certains intellectuels français témoignent d'une course à la visibilité dans le marché concurrentiel des idées.

Ceux qui ont jeté un coup d'œil sur la presse française en cette rentrée n'auront pu passer à côté du phénomène de la « guerre des intellectuels » qui s'est cristallisée de façon violente autour de la personne du philosophe Michel Onfray, dont certaines déclarations de nature politique ont surpris. Par exemple, *Le Monde* a considéré que l'affaire était suffisamment importante pour lui consacrer deux unes. Les uns se demandaient si les intellectuels ne seraient pas « à la dérive », tandis que les autres organisaient une manifestation le 20 octobre à la Mutualité, à Paris, pour répondre à la question : « Peut-on encore débattre en France ? »

Pour toute personne non directement impliquée dans ces joutes, le tout laisse une impression de dérisoire hystérie. Ces intellectuels, et le cercle de commentateurs qui leur est attaché, ont convoqué des accusations sérieuses et des mots souvent durs pour se désigner les uns les autres.

Et voici cette curiosité sociologique qui a motivé l'écriture de cette chronique : ne peut-on espérer que ce monde, censé être composé d'individus contrôlant le langage et les enjeux moraux qu'il implique, soit caractérisé par une forme de sage retenue ? Non certes une forme d'indifférence, mais un jugement dont la hauteur tempérée évoquerait quelque chose d'une sagesse ?

Cet espoir est bien entendu naïf pour qui connaît un peu l'histoire des polémiques intellectuelles, lesquelles n'ont pas souvent échappé à la règle de l'hystérie. Il l'est encore pour qui sait que les groupes d'individus en délibération peuvent être victimes d'un dénommé « effet de polarisation ». Cet effet se manifeste lorsqu'un groupe, ayant délibéré, adopte des positions plus radicales que la moyenne des positions individuelles avant la discussion. En d'autres termes, si la discussion fait parfois émerger une forme de tempérance du jugement, elle peut souvent aboutir à une radicalisation des positions de chacun.



LE MOT « CLASH » EST À LA MODE en France, comme le montre le nombre de pages web correspondantes trouvées par Google.

C'est là un fait qui a été mesuré à propos de nombreux sujets (l'évaluation des politiques d'aides sociales aux États-Unis, le féminisme, les préjugés racistes, etc.), y compris dans des groupes n'ayant pas de prédispositions à la radicalité, comme l'a rappelé le psychologue social américain Daniel Isenberg, auteur en 1986 d'un état de l'art sur ce point. On peut trouver bien des raisons à ce phénomène, par exemple que les individus ont tendance à s'engager dans une concurrence déclarative qui entraîne une partie du groupe dans des formes de surenchères.

Mais le fait est aussi que les intellectuels tentent de survivre dans un marché très concurrentiel : celui des idées. Et comme il y règne une certaine cacophonie, il faut parler fort pour se faire entendre. Ainsi, les uns n'hésitent plus à faire des déclarations fracassantes et outrées en gardant un œil sur le nombre de leurs relais sur Twitter, et les autres répondent par une indignation non moins excessive, ce qui est une bonne façon de se faire remarquer.

Ce dont il s'agit sur ce marché concurrentiel, c'est de faire de son discours un signe reconnu par autrui dans le bruit ambiant. La polémique et le « clash », pour utiliser un terme à la mode, sont de bons outils de distinction, même pour ceux qui font profession d'user de leur sagesse. D'ailleurs, ce n'est sans doute pas un hasard si le terme « clash » connaît un beau succès dans les recherches effectuées sur Google dans notre pays depuis 2013.

Reconnaissons que ces clashs impliquent plus souvent des rappeurs ou des starlettes de téléréalité que des essayistes, mais ayons aussi assez de lucidité pour penser que les processus dont ils usent pour se distinguer dans une économie de l'attention cacophonique ne sont peut-être pas si dissemblables. Cette conclusion n'est après tout pas si incommode ; le seul enseignement à tirer est sans doute que ces intellectuels ne se tiennent pas tellement plus haut que nous. ■

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

Objets D'ici & D'ailleurs


Bijoux solaires


Météorites


Cadrans solaires


Montres solaires

Bijoux Solaires

bijouxsolaires.com

La Clef des ETOILES



Boutique à Toulouse
& sur internet

laclefdesetoiles.com

Votre spécialiste du matériel d'observation astronomie & nature

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

Lu sur SciLogs

logs scientifiques de Pour la Science

Teilhard de Chardin : la bombe apostolique

par Alexandre Moatti, sur le blog Alterscience

Il y a 70 ans, les 6 et 9 août 1945, deux bombes atomiques rayaient de la carte Hiroshima et Nagasaki. Cette tragédie a donné lieu à des articles rétrospectivement effrayants, telle la une du *Monde* du 8 août, surtitrée « Une révolution scientifique ». Mais l'un des textes d'époque les plus surprenants à la gloire de la bombe atomique émane de… Pierre Teilhard de Chardin, jésuite et paléontologue (1881-1955). Publié en septembre 1946 dans la revue jésuite *Études*, il s'intitule « Quelques réflexions sur le retentissement spirituel de la bombe atomique » (à lire sur Gallica : http://bit.ly/pls_458_scilogs_2).



Le premier essai d'explosion nucléaire (Trinity), sur le champ de tir d'Alamogordo, au Nouveau-Mexique, en juillet 1945

De ce texte, on retiendra d'abord les adjectifs marquant l'émerveillement : « une lueur éblouissante », « un ébranlement formidable », « un événement prodigieux ». On note chez Teilhard une glorification de la pensée humaine, de la science, et même de ce qu'on appelle aujourd'hui la *Big Science* – la capacité des hommes à s'unir pour une réalisation scientifique –, ici celle de la bombe atomique.

À cet égard, l'un des points les plus curieux de sa démonstration est le suivant. Malgré les apparences, « l'homme s'ennuie » dans le monde moderne, et l'énergie atomique vient lui apporter de nouveaux horizons : « Pour avoir étendu notre main jusqu'au centre même de la matière, nous avons découvert à l'existence un intérêt suprême : l'intérêt de pousser plus loin, jusqu'au bout, les forces de la vie. »

Les conquêtes par les guerres disparaîtraient ainsi au profit des nouvelles conquêtes offertes par la science. Ce thème de la disparition de la guerre grâce à la bombe atomique est répandu à l'époque, mais Teilhard le pousse assez loin en imaginant avec « les récentes explosions de [l'atoll de] Bikini » (en juillet 1946) l'avènement d'« une humanité intérieurement et extérieurement pacifiée ».

Son leitmotiv (permanent dans son œuvre) est l'évolution vers « un être nouveau ». Après l'explosion test de Trinity dans le Nouveau-Mexique, en juillet 1945, les expérimentateurs « se redressent […], animés d'un nouveau sentiment de puissance ». L'homme, grâce à la bombe, peut « se grandir et s'achever biologiquement ». Ce thème de l'homme en évolution grâce à la science sera repris une décennie plus tard dans la revue *Planète* ; il est au fondement des mouvements transhumanistes actuels. Mais chez Teilhard, l'évolution de l'homme va vers la rencontre de Dieu : par l'explosion, « l'homme s'est trouvé sacré » ; c'est l'éternel retour où « l'homme collabore à sa propre genèse », où « nous avons mordu au fruit de la grande découverte ».

Toute la doctrine de Teilhard se trouve résumée dans la conclusion du texte : « En fin de compte, le dernier effet de la lumière projetée par le feu atomique dans les profondeurs psychiques de la Terre est d'y faire surgir, ultime et culminante, la question du terme de l'évolution, c'est-à-dire le problème de Dieu. »

Contrairement à d'autres textes de Teilhard, il n'y a pas ambiguïté sur les dates. Il est publié en septembre 1946, après Hiroshima et Nagasaki, et il a été écrit après ces événements, et non juste après les essais dans le désert américain (16 juillet 1945) comme le suggère la référence aux essais de Bikini.

De nos jours, on trouve un article sur le site du journal *La Croix* (http://bit.ly/pls_458_scilogs_3) pour parler encore de ce texte comme d'« une belle méditation ». Pour notre part, nous nous en tiendrons à la remarque faite par plusieurs auteurs depuis (certains l'excusent par le trop grand esprit d'abstraction de Teilhard), à savoir l'absence de mention – sans parler de compassion – des 200 000 victimes des deux bombes. ■



Alexandre MOATTI est historien des sciences à l'université Paris-Diderot (UMR 7219) et auteur du blog Alterscience (http://www.scilogs.fr/alterscience).

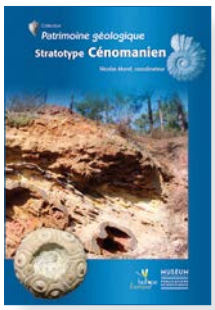
Retrouvez tous nos blogueurs sur www.sciLogs.fr et suivez-les sur les réseaux sociaux

MUSÉUM
NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE

patrimoine géologique







STRATOTYPE CÉNOMANIEN

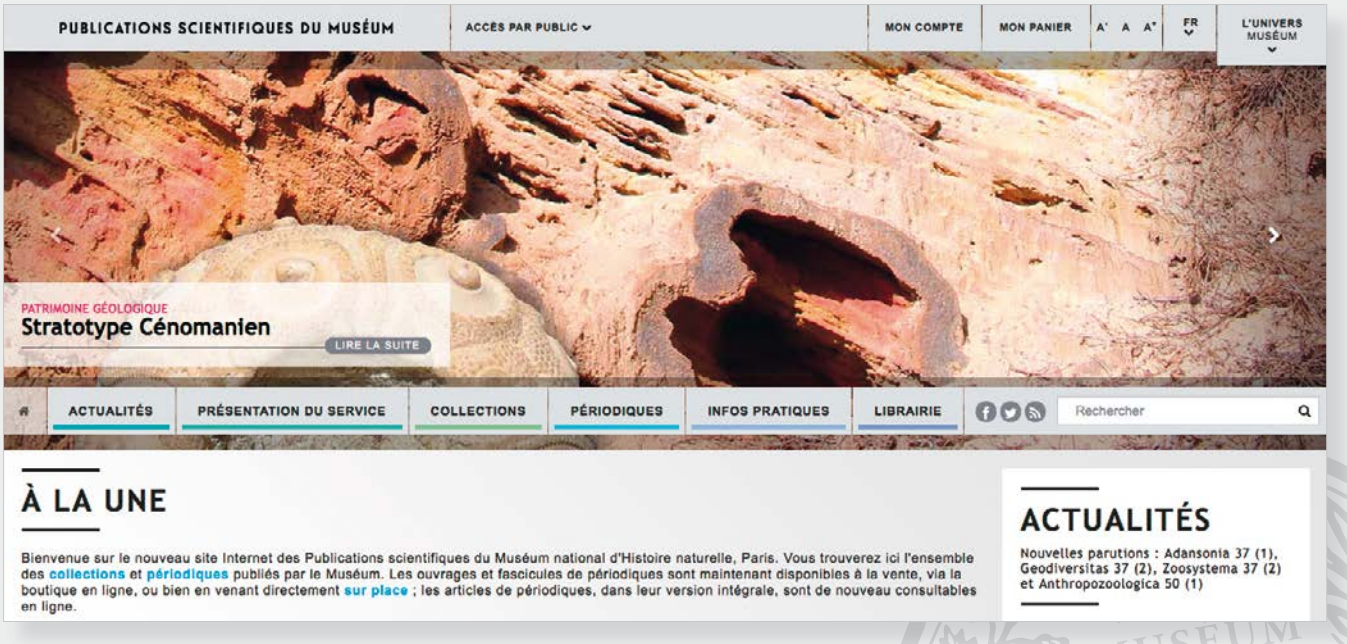
Nicolas **Morel**, coordinateur

Le temps du géologue est divisé en étages définis par les fossiles qu'ils contiennent. Afin d'établir des références universelles, certains sites où les couches géologiques correspondant à ces étages affleurent ont été qualifiés de « stratotypes ». La collection a pour objet de publier des synthèses sur chacun des stratotypes situés en France.

La région du Mans (*Cenomanum*) a été choisie par Alcide d'Orbigny en 1847 comme le type d'un nouvel étage géologique du Crétacé qui constitue aujourd'hui la référence internationale de l'étage Cénomanien. L'ambition de cet ouvrage est dans un premier temps de faire découvrir l'histoire de l'étude du Cénomanien. Les sites historiques, dont la plupart sont aujourd'hui inaccessibles, sont également décrits. Dans un deuxième temps, la région stratotypique est décryptée afin de comprendre l'enchaînement des formations géologiques qui constituent le Cénomanien local puis de les replacer au sein du Bassin parisien, voire plus largement à l'échelle mondiale. Une part importante de ce volume est consacrée à la paléontologie du stratotype qui est en grande partie à l'origine de sa sélection par d'Orbigny. Certains groupes fossiles, notamment les mollusques, les crustacés et les échinodermes, sont d'une richesse exceptionnelle. Enfin, le stratotype Cénomanien, par ses sites et ses collections, est un élément indiscutable du patrimoine géologique national.

Collection **Patrimoine géologique**, tome 6 | 165 x 240 mm broché | texte en français | 384 p., 274 figures coul., 11 tableaux | CD-ROM (contenu paléontologique et chapitres complémentaires) | **ISBN** 978-2-85653-775-6 | **Prix** 35,90 € TTC (34,03 € HT) | Septembre 2015

Plus de renseignements et de contenus sur la librairie en ligne des Publications scientifiques



Commandez vos ouvrages depuis le **monde entier** sans intermédiaire.
Navigation transversale par **Moteur de recherche**, **Thèmes** et **Géozones**.

Téléchargez gratuitement les articles des revues *Geodiversitas*, *Zoosystema* et *Adansonia* (publiés depuis 2000).
D'autres revues sont consultables ou référencées...

Composez votre propre sélection en éditant un **catalogue** personnalisé au format PDF (A4).

SCIENCEPRESS.MNHN.FR

MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE
PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES



Comment HOMO SAPIENS a conquis la planète

Curtis Marean

Une grande capacité à coopérer et l'invention des armes de jet expliqueraient pourquoi, de toutes les espèces humaines ayant vécu sur Terre, la nôtre est la seule à avoir envahi la planète entière

On ignore quand exactement, mais il y a environ 100 000 ans, *Homo sapiens* aborde l'Eurasie à partir de l'Afrique. L'expansion de notre espèce sur la planète s'enclenche, inexorablement. Nos ancêtres finissent par gagner tous les continents et de très nombreux archipels. Sur leur chemin, ils rencontrent des membres d'autres espèces humaines, qui disparaissent toutes, à l'instar d'un grand nombre d'espèces animales. Le passage en Eurasie d'*Homo sapiens* est sans doute l'événement migratoire majeur de toute l'histoire de notre planète.

Pourquoi l'espèce *Homo sapiens*, l'« homme moderne », est-elle la seule à avoir tout dominé ? Pour certains paléoanthropologues, cela tiendrait à son gros cerveau ; pour d'autres, aux innovations techniques d'*H. sapiens* ; pour d'autres encore, au climat, qui aurait affaibli les espèces humaines concurrentes. Étant donné l'amplitude spectaculaire de l'expansion d'*H. sapiens*, aucune de ces théories ne convainc et il nous manque une théorie décrivant cet événement complexe dans sa globalité.

Nos découvertes en Afrique du Sud ainsi que plusieurs avancées en biologie et en sciences sociales m'ont amené à proposer un mécanisme simple susceptible d'expliquer la conquête du globe par *H. sapiens*. Selon moi, cette étonnante dispersion s'est produite d'abord grâce à l'évolution et à l'inscription dans les gènes de nos ancêtres de la capacité à coopérer entre individus non apparentés. Ce trait singulier de notre espèce expliquerait l'adaptation de nos ancêtres à tant d'environnements différents et aurait favorisé l'innovation, laquelle a entraîné la mise au point d'armes de jet efficaces. Ainsi équipés et dotés d'un comportement collectif très adaptatif, nos ancêtres sont

L'ESSENTIEL

- ***Homo sapiens*** est la seule espèce humaine à avoir colonisé la planète entière. Les anthropologues se demandent depuis longtemps pourquoi.
- Des conditions glaciaires ont sélectionné chez les hommes modernes une forme d'hypersocialité.
- La grande capacité à coopérer qui en a résulté et l'invention d'armes de jet performantes ont placé *H. sapiens* en position de dominer le monde.

sortis d'Afrique et ont soumis le monde à leur volonté.

La colonisation de la planète par *H. sapiens* est vraiment extraordinaire. Pour s'en rendre compte, remontons à la naissance de notre espèce en Afrique, il y a quelque 200 000 ans.

Des dizaines de milliers d'années durant, nos premiers ancêtres restent sur le continent africain, puis, il y a environ 100 000 ans, voire avant, quelques groupes de ces « hommes anatomiquement modernes » font une incursion au Moyen-Orient. L'opinion dominante parmi les préhistoriens est que ces pionniers auraient été incapables d'aller plus loin *(voir l'encadré page 31)*.

Une expansion qui a démarré il y a moins de 70 000 ans

Puis, il y a moins de 70 000 ans, une population fondatrice sort d'Afrique et s'étend en Eurasie. Ses membres rencontrent et côtoient des membres d'autres espèces humaines, par exemple les Néandertaliens en Europe et les Denisoviens en Asie. Force est de constater que, peu après l'arrivée des hommes modernes, les traces des autres humains se perdent, bien qu'une partie de leur ADN persiste chez nos contemporains, sans doute à la suite de métissages occasionnels.

Parvenus sur les rivages de l'Asie du Sud-Est, bloqués par une mer apparemment illimitée et dépourvue d'îles, les hommes modernes vont pourtant trouver les moyens de poursuivre leur expansion. Il y a plus de 45 000 ans, ils réussissent à faire la traversée vers l'Australie. Des groupes disposant d'armes de jet et maîtrisant le feu occupent très vite le royaume des marsupiaux qu'aucun humain n'avait encore foulé. Ils en font vite disparaître les plus grandes espèces marsupiales, avant, il y a quelque 40 000 ans, de passer en Tasmanie par un isthme alors émergé.

Dans l'hémisphère Nord, une population d'*H. sapiens* pénètre en Sibérie. Elle rayonne dans les régions entourant le pôle Nord, mais les glaces les empêchent d'atteindre l'Amérique. Selon le consensus scientifique, cela ne sera fait qu'il y a 14 000 ans environ, quand des groupes de chasseurs traversent la Béringie, c'est-à-dire l'isthme qui reliait alors la Sibérie orientale à l'Alaska. L'arrivée en Amérique de chasseurs humains auxquels la faune n'avait encore jamais été confrontée provoque le massacre et entraîne la disparition de grands animaux américains, tels les mastodontes et les paresseux géants…

Une fois établis en Amérique, les hommes modernes n'ont besoin que de quelques milliers d'années pour atteindre l'extrême sud de l'Amérique.

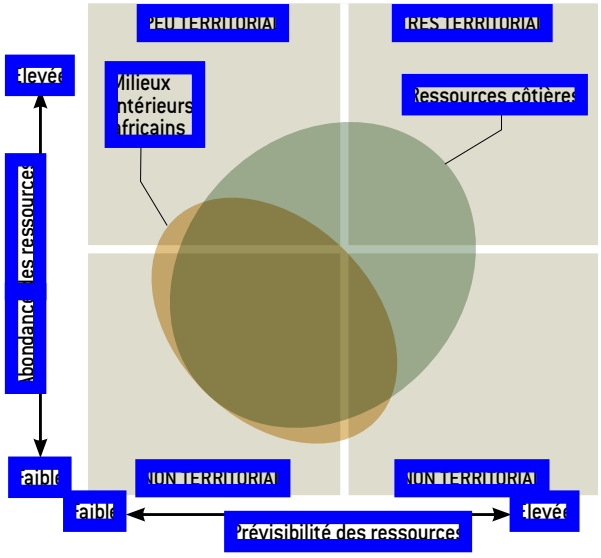
Quant à Madagascar et à la plupart des îles du Pacifique, elles restent préservées de la présence humaine pendant encore 10 000 ans, puis des peuples marins découvrent et colonisent ces endroits. Ces îles aussi souffrent de l'arrivée des hommes modernes, qui remodèlent l'environnement, brûlent les forêts et exterminent des espèces. Seule l'Antarctique restera préservée de l'homme jusqu'à la fin de l'ère industrielle.

Pourquoi et comment, après être resté des dizaines de milliers d'années confiné dans son continent d'origine, *H. sapiens* en est-il sorti et a-t-il colonisé toutes les terres atteignables ? Une bonne théorie de cette dissémination devra expliquer deux choses : d'une part, le moment où elle a commencé ; d'autre part, l'adaptation à tous les milieux et l'évincement des autres espèces humaines rencontrées. Pour échafauder une telle théorie, je propose que l'évolution a conféré à notre espèce des caractères qui l'ont dotée d'avantages compétitifs et dont étaient dépourvues les autres espèces humaines.

Le premier de ces traits est selon moi la très grande capacité de coopération des hommes modernes. Les membres de notre espèce s'engagent en effet sans cesse dans des activités collectives extrêmement

DEFENDRE UN TERRITOIRE PLEIN DE RESSOURCES

Une loi de la biologie est que la sélection naturelle favorise la territorialité, c'est-à-dire la défense agressive des ressources alimentaires, chaque fois que les bénéfices d'un accès exclusif à ces [illegible] petites sociétés humaines, la territorialité se développe particulièrement chaque fois que les ressources alimentaires sont abondantes localement et prévisibles. Or les régions côtières africaines où vivaient nos ancêtres offraient des bancs de coquillages et des crustacés faciles à pêcher constituant de telles ressources. Cet environnement a pu développer à un haut degré la territorialité dans les premiers groupes de *Homo sapiens*.



complexes avec des individus qu'ils connaissent à peine et qui ne leur sont pas apparentés. Dans son livre *L'instinct maternel* (*Mothers and Others*, en anglais), Sarah Blaffer Hrdy, une anthropologue de l'université de Californie à Davis, s'imagine plusieurs centaines de chimpanzés en train de faire la queue pour prendre l'avion, s'embarquant, puis restant assis pendant des heures avant de sortir comme des robots répondant à un signal… inimaginable ! Dans une telle situation, nos cousins primates ne cesseraient de se battre. Cette expérience de pensée souligne à quel point les hommes modernes sont coopératifs.

L'hyperprosocialité, notre marque de fabrique

Pour nommer ce penchant extrême à la coopération, j'ai forgé le néologisme d'« hyperprosocialité ». Pour moi comme pour beaucoup de mes collègues, l'hyperprosocialité n'est pas un trait acquis, mais un trait inné, que l'on ne rencontre que chez *H. sapiens*. D'autres animaux, tels les loups ou les bovidés, ont aussi des tendances prosociales, mais elles ne sont qu'un pâle reflet de la nôtre. Cette nature coopérative est à double tranchant. Les mêmes humains qui risquent leur vie pour défendre de parfaits étrangers peuvent aussi s'associer pour les combattre sans pitié.

Ainsi, l'hyperprosocialité serait notre « marque de fabrique ». La question de savoir comment nos ancêtres l'ont acquise est difficile. Une récente modélisation mathématique de l'évolution sociale en a toutefois fourni des indices intéressants. Sam Bowles, économiste à l'institut de Santa Fe (spécialisé dans l'étude des systèmes complexes), a montré que, paradoxalement, l'existence de conflits entre groupes est une condition optimale à la propagation de l'hyperprosocialité au sein d'une population. Dans une telle situation, ce sont les groupes composés du plus grand nombre d'individus prosociaux qui « fonctionnent » le mieux et prennent l'avantage, grâce à quoi ils transmettent mieux leurs gènes aux générations suivantes. La propagation de l'hyperprosocialité dans l'espèce humaine est ainsi facilitée.

Les travaux du biologiste Pete Richerson, de l'université de Californie à Davis, et de l'anthropologue Rob Boyd, de l'université de l'Arizona, suggèrent en outre qu'un tel comportement se propage mieux s'il apparaît dans une sous-population, si la compétition entre groupes y est intense et si ces groupes sont petits. Or la génétique a prouvé que la population africaine originelle d'*H. sapiens* était très petite.

Les chasseurs-cueilleurs ont tendance à vivre en petites bandes d'environ vingt cinq individus, et à rechercher leurs conjoints dans les clans voisins. Leurs clans forment des « tribus » caractérisées par une certaine communauté de langage et de traditions, et dont la cohésion est maintenue par des liens de parenté et des échanges de présents. Or il arrive que les tribus se rassemblent pour combattre d'autres tribus. Les membres des clans risquent alors beaucoup, ce qui pose la question de leur motivation.

Quand est-il rentable de se battre ? La théorie de la « défendabilité économique » (*economic defendability*) apporte quelques éclairages. Introduite en 1964 par l'Américain Jerram Brown pour expliquer les variations de l'agressivité territoriale chez les oiseaux, elle traduit l'idée que la défense des ressources d'une espèce a un coût, que ce soit en termes de blessures, d'énergie dépensée ou d'accès aux ressources. Selon Jerram Brown, les individus agissent avec agressivité lorsqu'ils poursuivent des objectifs dont l'atteinte augmente leurs chances de survie et de reproduction. Ainsi, la sélection naturelle favorisera un comportement agressif lorsque ce dernier permet d'atteindre de tels objectifs.

Par exemple, un animal a intérêt à défendre sa nourriture quand celle-ci est menacée. En fonction de la fréquence de cette menace, un comportement agressif pourra éventuellement être sélectionné. En revanche, si la nourriture ne peut être défendue ou s'il est trop coûteux de le faire, ce comportement agressif, avec toutes les blessures qu'il promet, risque d'être contre-productif.

Dans un article de 1978, les Américains Rada Dyson-Hudson et Eric Alden Smith ont appliqué le concept de défendabilité économique aux petites sociétés humaines. Leurs résultats montrent que la défense de ressources a du sens surtout quand ces dernières sont importantes et prévisibles (d'un accès sûr). J'ajouterais qu'elles doivent aussi être cruciales pour l'organisme en question : aucun animal ne défend une ressource dont il n'a pas besoin.

L'AUTEUR



Curtis MARLEAN est professeur à l'école d'évolution humaine et de changement social à l'université d'Arizona, aux États-Unis.

La défense des ressources d'une espèce a un coût



CES MICROLITHES provenant du site de Pinnacle Point *(à gauche)* prouvent que des hommes modernes avaient déjà inventé des armes de jet il y a 71 000 ans. Ils fixaient ces lames sur des hampes en bois pour fabriquer des sagaies, comme dans ces reconstitutions *(à droite)*.

Ce principe écologique de base s'applique aussi à l'humanité : tant des États que des ethnies, voire des groupes religieux, se battent durement pour le contrôle de ressources prévisibles et précieuses, telle le pétrole, l'eau ou encore les terres arables. L'une des conséquences de cette théorie territoriale est qu'à l'époque des premiers *H. sapiens*, les régions favorisant la compétition entre groupes, et donc les comportements coopératifs, n'ont pu recouvrir qu'une partie seulement de l'aire de répartition de l'espèce. Cette partie est composée de toutes les régions où les ressources étaient de qualité, abondantes et prévisibles.

À l'intérieur de l'Afrique, les ressources sont souvent rares et imprévisibles, ce qui explique que la plupart des groupes de chasseurs-cueilleurs africains ayant été étudiés investissent peu de temps et d'énergie pour défendre un territoire. Certaines régions côtières ont toutefois des ressources alimentaires importantes et prévisibles, par exemple des bancs de coquillages ou des crustacés faciles à pêcher. Or tant l'ethnographie que l'archéologie montrent que les régions où apparaissent les plus hauts niveaux de conflits entre groupes sont celles dont l'économie est fondée sur les ressources côtières, comme ce fut le cas par exemple au sein des peuples vivant sur la côte pacifique nord de l'Amérique.

Quand les hommes ont-ils fondé pour la première fois leur subsistance sur des ressources importantes et prévisibles ? Des millions d'années durant, nos lointains ancêtres se sont nourris des produits de la cueillette, de la chasse et de la pêche, autant de ressources qui ne sont en général disponibles qu'en faibles quantités imprévisibles. C'est pourquoi nos ancêtres chasseurs-cueilleurs vivaient en petits groupes dispersés et mobiles, se déplaçant constamment à la recherche de nourriture. Toutefois, avec la complexification de la cognition humaine, une population humaine a compris qu'elle pourrait mieux assurer sa subsistance en se nourrissant de coquillages et de crustacés.

Les fouilles de mon équipe sur les sites de Pinnacle Point prouvent qu'il y a 160 000 ans, ce changement de comportement avait débuté sur la côte sud de l'Afrique. C'est là peut-être que, pour la première fois dans l'histoire de l'humanité, des groupes humains se sont spécialisés dans l'exploitation d'une ressource alimentaire importante, prévisible et de grande valeur – une avancée qui a déclenché une mutation sociale.

Des indices génétiques et archéologiques suggèrent que pendant la période froide qui va de 195 000 à 125 000 ans environ, l'humanité est passée par un goulot d'étranglement démographique, c'est-à-dire par des effectifs très faibles. Alors que les rudes conditions glaciaires rendaient rares végétaux et animaux comestibles dans les écosystèmes de l'intérieur de l'Afrique, les environnements côtiers lui fournirent sans nul doute des « refuges alimentaires ».

Des refuges alimentaires sources de conflits

Toutefois, la nécessité de contrôler les vitales ressources côtières constituait aussi une raison sérieuse de conflits. Jan de Vynck, de l'université métropolitaine Nelson Mandela, a récemment montré que les bancs de fruits de mer de la côte sud de l'Afrique peuvent être si productifs qu'ils fournissent jusqu'à 4 500 kilocalories par heure de collecte ! Une telle côte constitue ainsi une ressource alimentaire importante, prévisible et de grande valeur. Elle n'a pu qu'entraîner nos ancêtres à défendre leur territoire. Cette « territorialité » a produit un haut niveau de conflits, se traduisant par des combats réguliers, bref par une compétition guerrière, qui a sélectionné les comportements hyperprosociaux. Se

battre pour s'assurer de conserver un accès exclusif aux gisements de coquillages et de crustacés était avantageux pour le groupe. Cela a induit un comportement collaboratif, qui s'est propagé dans toute la population.

La coopération au sein de groupes d'individus non apparentés a transformé les hommes modernes en une force irrésistible. Je pense toutefois qu'ils n'ont atteint leur plein potentiel que le jour où ils ont disposé d'une nouvelle technique décisive : les armes de jet efficaces.

Le développement des armes de jet

Cette invention a dû mettre très longtemps à émerger. Les armes de jet ont vraisemblablement évolué ainsi : des épieux de bois ont d'abord été lancés à la main, puis des sagaies plus légères, avant que vienne l'idée du propulseur, un dispositif à effet de levier accroissant la portée des projectiles ; ensuite, l'arc et les flèches, les sarbacanes puis tous les moyens inventés par les hommes pour lancer des projectiles mortels se sont ensuivis.

À chaque étape, les armes de jet sont devenues plus létales. Une lance de bois taillée en pointe produit une blessure ponctuelle, qui ne provoque qu'une faible hémorragie chez l'animal visé. En armant leurs sagaies de lames de pierre, nos ancêtres ont augmenté le saignement provoqué par la blessure. Une telle élaboration d'armes composites requiert la combinaison de plusieurs techniques : la taille d'une pierre, le façonnage d'une hampe facilitant la fixation, un collage ou un lien…

Avec des collègues, Jayne Wilkins, de l'université du Cap, a montré que des outils en pierre provenant du site sud-africain Kathu Pan 1 ont été employés comme pointes de lances il y a environ 500 000 ans. L'âge des techniques de Kathu Pan 1 indique qu'elles sont l'œuvre des derniers ancêtres communs (*Homo heidelbergensis*) des Néandertaliens et des hommes modernes. Or des vestiges datant de 200 000 ans montrent que, comme on pouvait s'y attendre, les

Les armes de jet sont devenues de plus en plus meurtrières

Quand *Homo sapiens* est-il vraiment sorti d'Afrique ?

La carte publiée sur la double page suivante résume la dispersion de notre espèce sur la planète, telle qu'on la voit actuellement. Elle est fondée sur l'idée dominante

qu'il y a 70 000 ans environ, ce qui est de plus en plus douteux

En 2010, l'équipe internationale de Wu Liu, de l'Académie des sciences chinoises, annonçait avoir trouvé un bout de mandibule de *Homo sapiens* sous un plancher stalagmitique dans la grotte de Zhiren dans le sud chinois. Or la datation de ce plancher par l'uranium-thorium ne laisse pas de doute : il date de plus de 100 000 ans. Toutefois, à cause de la présence sur la mandibule de traits considérés comme archaïques, une partie des chercheurs refuse de conclure avec Wu Liu à la présence ancienne de notre espèce en Asie orientale. Pas découragé, il vient, avec une nouvelle équipe internationale, de découvrir dans la grotte de Fuyan, elle aussi dans le sud chinois, une série de dents indéniablement *sapiens*. La datation de fragments de stalagmites trouvés à côté des dents indique un âge compris entre 120 000 et 80 000 ans. Plus de doute, cette fois : des hommes modernes sont arrivés en Asie du Sud-Est il y a bien plus de 70 000 ans.

Pourquoi situe-t-on à cette date le début de la dispersion d'*H. sapiens* ? Dans les années 1930, des *H. sapiens* archaïques sont découverts dans les grottes de Qafzeh et de Skhull en Israël, donc hors d'Afrique. Ils sont datés d'arcades sourcilières prononcées et d'autres traits archaïques observés aussi sur les *H. sapiens* nord-africains de même époque. Par ailleurs, on note que ces *H. sapiens* partagent la culture matérielle des Néandertaliens (le Moustérien), qui sont aussi au Levant et qui y resteront encore 40 000 ans. Bref, on conclut que les premiers membres de notre espèce hors d'Afrique y ont reflué, car ils n'étaient pas encore capables de conquérir la planète.

Que changent à ce propos les trouvailles de l'équipe de Wu Liu ? La mandibule de Zhiren est *sapiens*, certes, mais « archaïque ». La question est de savoir si ses traits particuliers résultent de son appartenance à une vague d'*H. sapiens* archaïques sortis d'Afrique il y a plus de 100 000 ans ou du métissage de ses membres avec ceux des espèces humaines archaïques rencontrées en chemin. Cette dernière possibilité semble d'autant plus envisageable que l'on vient de constater que 8 % des gènes d'un *H. sapiens* mort il y a 45 000 ans en Roumanie étaient néandertaliens. Si une première vague *sapiens* est sortie d'Afrique il y a plus de 100 000 ans, alors notre espèce et celles qui l'ont précédée en Eurasie ont cohabité des dizaines de milliers d'années.

Les hommes dits archaïques ont-ils disparu parce que les hommes modernes les ont exterminés ? C'est la possibilité la plus souvent évoquée, mais pas la seule. Une autre serait que notre espèce ait crû si vite qu'elle a absorbé les autres après avoir recueilli leur expérience par métissage génétique et culturel.

François Savatier
Pour la Science

deux espèces ont fabriqué des armes de et. Pendant un temps, un certain équi- ibre entre Néandertaliens et premiers *H. sapiens* a donc dû se maintenir, mais a situation allait évoluer.

Selon les préhistoriens, l'apparition dans le registre archéologique d'outils dits « microlithiques » (lames et lamelles de pierre) signale l'avènement de projec- iles légers conçus et optimisés en fonc- ion des lois balistiques pour être lancés. Trop petits pour être utilisés à la main, les microlithes étaient fixés dans des sillons reusés dans l'os ou le bois.

Les plus anciens exemples connus de ce ype de technique proviennent justement de Pinnacle Point. Là, dans l'abri rocheux PP5-6, mon équipe a mis au jour de nom- breux témoignages d'une longue occupation humaine. En utilisant la datation par la uminescence stimulée optiquement, Zeno- bia Jacobs, de l'université de Wollongong en Australie, a montré que la séquence archéologique correspondante s'étend de

L'ULTIME ENVAHISSEUR

Homo sapiens n'a pas seulement suivi ses prédéces- seurs. Il les a dépassés en abordant des terres vier- ges, dont il a transformé les écosystèmes.

Après l'apparition du genre Homo en Afrique (en violet), certains de nos premiers ancêtres ont quitté le berceau afri- cain, il y a deux millions d'années environ. Se dispersant en Eurasie, ils y ont évolué pour donner *Homo erectus*, qui a lui-même évolué en Néandertaliens et en Denisoviens *(en vert)*. Il y a 200 000 ans environ apparaissent les premiers membres de l'espèce *H. sapiens*. Il y a 160 000 ans environ, le climat se détériore de sorte qu'une grande partie des terres africaines devient inhabitable. Des groupes d'hommes modernes se réfugient alors sur la côte sud de l'Afrique, où ils subsistent grâce aux riches gisements de coquillages et de crustacés qui s'y trouvent. L'auteur fait l'hy- pothèse que cette adaptation a fait apparaître une tendance à la coopération avec des individus non apparentés, inscrite dans les gènes, car il fallait défendre les ressources de fruits de mer contre les intrus. Remarquablement coopératifs et entretenant de nombreux liens sociaux, nos ancêtres sont alors devenus toujours plus inventifs, créant notamment la technique clé des armes de jet.

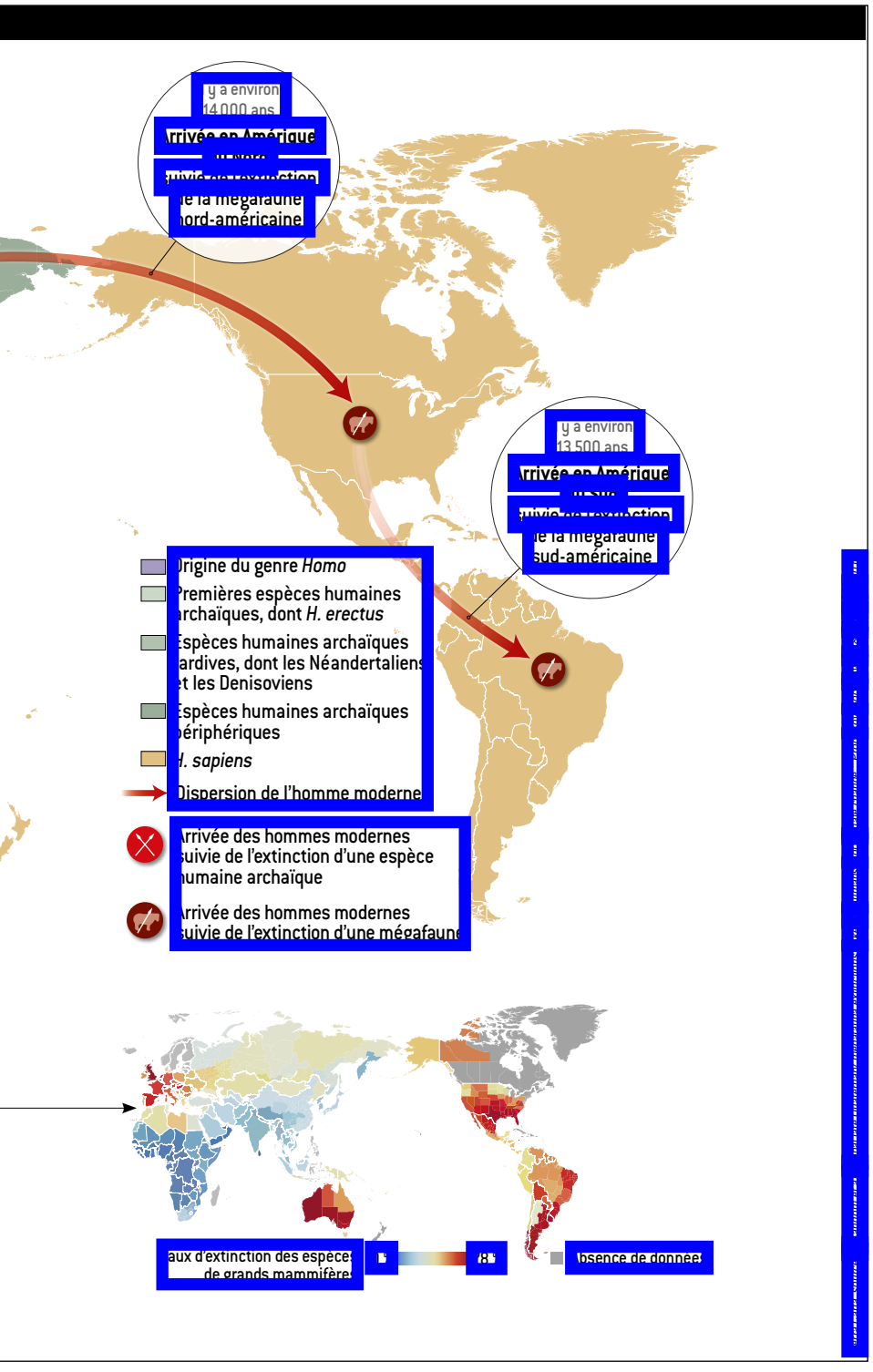
Après l'apparition de cette grande capacité à la coopéra- tion et de la maîtrise de la fabrication et de l'usage d'armes de jet perfectionnées, *H. sapiens* s'est lancé dans la conquête de la planète *(flèches rouges)*. Au-delà de l'Europe et de l'Asie, il s'est alors installé sur des continents et des archipels n'ayant jamais été habités auparavant par une autre espèce humaine *(en marron clair)*.



90 000 à 50 000 ans avant le présent. Les outils microlithiques les plus anciens de ce site remontent à environ 71 000 ans.

Ces dates suggèrent qu'un changement climatique a peut-être accéléré la mise au point d'armes de jet performantes. Il y a plus de 71 000 ans, les habitants de PP5-6 fabriquaient des pointes et des lames en pierre à partir de quartzite. Comme l'a bien montré Erich Fisher, l'un des membres de notre équipe, la mer était à l'époque proche de Pinnacle Point. Les reconstitutions climatiques et de l'environnement faites par Mira Bar-Matthew, du Service géologique israélien, et par Kerstin Braun, de l'université d'Arizona, révèlent un environnement caractérisé par de fortes pluies hivernales et une végétation arbustive, comme celui d'aujourd'hui. Mais il y a environ 74 000 ans, le climat de la planète a commencé à basculer vers un régime glaciaire. La mer a reculé, exposant la plaine continentale, et les pluies d'été se sont accrues, ce qui a multiplié les prairies grasses et les bois d'acacias. Nous pensons qu'un vaste écosystème à migrations saisonnières s'est alors créé sur la plaine autrefois submergée : les herbivores s'y déplaçaient vers l'est chaque été, puis vers l'ouest en hiver, en suivant à la trace les chutes de pluies et donc les poussées d'herbe fraîche.

On ignore pourquoi, après ce changement climatique, les habitants de PP5-6 ont commencé à fabriquer des armes de jet légères. Tout suggère cependant que c'était pour abattre des animaux migrant à travers la nouvelle plaine. Quelle qu'en soit la raison, les individus de cette région ont développé une méthode ingénieuse pour fabriquer leurs petits outils : ils se sont tournés vers un nouveau matériau de base – une roche appelée silcrète – qu'ils ont appris à chauffer au feu afin de faciliter sa taille en lames et lamelles coupantes. Ainsi, une conséquence du changement climatique aurait été l'accès qu'ont eu ces premiers hommes modernes à un approvisionnement régulier en bois de chauffage provenant des abondants acacias, et la fabrication d'outils microlithiques en silcrète qui deviendra une tradition durable.



L'apparition des microlithes

Nous ne savons pas encore dans quelles armes de jet ces microlithes étaient employés. Ma collègue Marlize Lombard, de l'université de Johannesburg, en a étudié des exemples plus récents trouvés sur d'autres sites. Le fait que les traces d'impacts observées sur ces artefacts sont comparables à celles que l'on voit sur des pointes de flèches prouve pour elle que les microlithes sont à l'origine des armatures de flèches. Je ne suis pas tout à fait convaincu, car elle n'a pas étudié dans son étude les traces d'impacts que l'on trouve sur des projectiles lancés au propulseur. Que ce soit à Pinnacle Point ou ailleurs, je pense que le propulseur, un système plus simple que l'arc et les flèches, a précédé ces derniers.

Les Néandertaliens, une population trop petite pour réussir

Les Néandertaliens aussi sont entrés en expansion : il y a environ 130 000 ans, ils se sont dispersés au Proche-Orient et dans une partie de l'Asie occidentale. Ce faisant, ils ont rencontré de nombreux milieux et changements climatiques. Dès lors, pourquoi n'ont-ils pas autant réussi qu'*Homo sapiens* ?

Pour y réfléchir, les préhistoriens tentent depuis longtemps d'évaluer leur population. Toutefois, les sites, la saisonnalité des occupations, les quantités de vestiges laissés sont des indices très incertains. Ils sont quand même parvenus à la conviction que les effectifs néandertaliens n'ont jamais dépassé 200 000, et encore seulement peut-être pendant les périodes climatiques les plus favorables. Les paléodémographes procèdent à la même estimation à partir du nombre de femmes en âge de se reproduire, de la durée moyenne de vie d'un individu, du nombre d'enfants survivants arrivant à l'âge de la procréation et autres paramètres démographiques. Ils parviennent à des effectifs compris entre 5 000 et 70 000, qui se mesurent donc en milliers.

Cette très faible taille de la population néandertalienne peut surprendre, mais l'analyse des gènes néandertaliens la confirme. Ainsi, le séquençage de l'ADN mitochondrial de trois fossiles de Néandertaliens européens (de Vindija en Croatie, de Feldhofer en Allemagne et d'El Sidrón en Espagne) a conduit à une estimation du nombre des femmes en âge de se reproduire compris entre 5 000 et 9 000 seulement. D'autres estimations effectuées à partir de l'ADN nucléaire néandertalien déjà séquencé convergent vers cet ordre de grandeur de ce que les démographes nomment la population féminine efficace.

Ce résultat impressionnant est confirmé par l'observation de la diversité génétique néandertalienne. Dans un échantillon de trois Néandertaliens n'ayant vécu ni aux mêmes endroits ni aux mêmes époques (El Sidrón en Espagne, Vindija en Croatie, Denisova dans l'Altaï), les paléogénéticiens ont trouvé un très grand nombre de gènes homozygotes. Or on sait bien que dans une population fortement homozygote, de nombreux individus expriment des maladies génétiques et ont peu ou pas de descendance. Du reste, l'étude de la femme néandertalienne de Denisova montre qu'elle était le produit d'une union hautement consanguine : elle a été conçue par un couple formé d'un demi-frère et d'une demi-sœur, ou de doubles cousins, ou d'un oncle et d'une nièce, ou d'une tante et d'un neveu, ou d'un grand-père et de sa petite-fille, ou encore d'une grand-mère et de son petit-fils…

Il est clair qu'un effectif aussi faible n'a pu que fragiliser les cultures néandertaliennes face aux cultures *sapiens* en expansion. Pour autant, si les Néandertaliens étaient si peu nombreux, ils ont pu aussi être entièrement absorbés dans la masse *sapiens*. C'est ce que suggèrent les génomes eurasiens actuels, qui contiennent à 3 % de gènes néandertaliens.

– Silvana Condemi
CNRS, univ. d'Aix-Marseille

Je crois aussi que, comme les chasseurs-cueilleurs africains qui ont été étudiés par l'ethnographie, les premiers *H. sapiens* ont découvert qu'avec du poison, il était possible d'accroître le pouvoir meurtrier des projectiles. Une mise à mort, en effet, est toujours un chaos dangereux. Quand, dans la poussière, le sang et les odeurs de sueur et d'urine, un animal a été mis à terre, c'est sans doute là qu'il devient le plus meurtrier. Instinctivement, il emploie sa dernière énergie à se relever, puis à charger son agresseur pour, si possible le transpercer, par exemple d'un coup de corne. Les vies brèves et les corps brisés des Néandertaliens montrent qu'ils ont souvent subi les conséquences de ces instants dangereux de la chasse aux gros animaux, effectuée sans doute en lançant des épieux à la main. Un projectile paralysant a l'avantage de permettre au chasseur de s'approcher pour mettre à mort la proie sans trop de danger. Une telle arme a constitué une avancée technique majeure.

L'association d'armes de jet perfectionnées et d'un comportement hyperprosocial a créé un type nouveau de prédateur : un groupe humain aux membres très coopératifs. Face à un tel superorganisme, plus aucune proie ou ennemi humain n'était en sécurité. Prenons conscience de l'efficacité de la combinaison de nouvelles caractéristiques : elle a par exemple rendu possible que six marins ne parlant pas la même langue souquent de concert à travers une houle de dix mètres jusqu'à mettre le harponneur à portée d'une baleine, un animal normalement trop puissant pour être pêché. De la même façon, une tribu de cinq cents personnes constituée de vingt clans connectés peut très vite constituer une petite armée apte à aller venger l'incursion territoriale d'une tribu voisine.

Coopération et prédation, un étrange mélange

L'émergence de cet étrange mélange de coopération et de prédation pourrait bien expliquer pourquoi, quand les conditions glaciaires sont revenues il y a entre 74 000 et 60 000 ans et ont à nouveau rendu inhospitalière la plus grande partie de l'Afrique, la population des *H. sapiens* a commencé à se disperser. Au lieu de se confiner à

BIBLIOGRAPHIE

C. W. Marean, **The origins and significance of coastal resource use in Africa and Western Eurasia**, *Journal of Human Evolution*, vol. 77, pp. 17-40, 2014.

K. S. Brown *et al.*, **An early and enduring advanced technology originating 71,000 years ago in South Africa**, *Nature*, vol. 491, pp. 590-593, 2012.

C. W. Marean, **Quand la mer sauva l'humanité**, *Pour la Science*, n° 396, octobre 2010.

'extrémité de l'Afrique, comme lors de a précédente période froide, elle s'est répandue en Afrique australe et y a prospéré à l'aide d'une grande diversité d'outils perfectionnés. En effet, lors de cette nouvelle période climatique difficile, les hommes modernes étaient désormais assez bien pourvus en avantages sociaux et en techniques adaptées pour faire face. Les *H. sapiens* sont donc devenus les grands prédateurs des terres, avant, un jour, de se devenir aussi sur les mers. Grâce à cette capacité à maîtriser n'importe quel environnement africain, ils ont pu s'aventurer hors d'Afrique et aborder l'Eurasie, puis le reste du monde.

Les autres espèces humaines déclassées

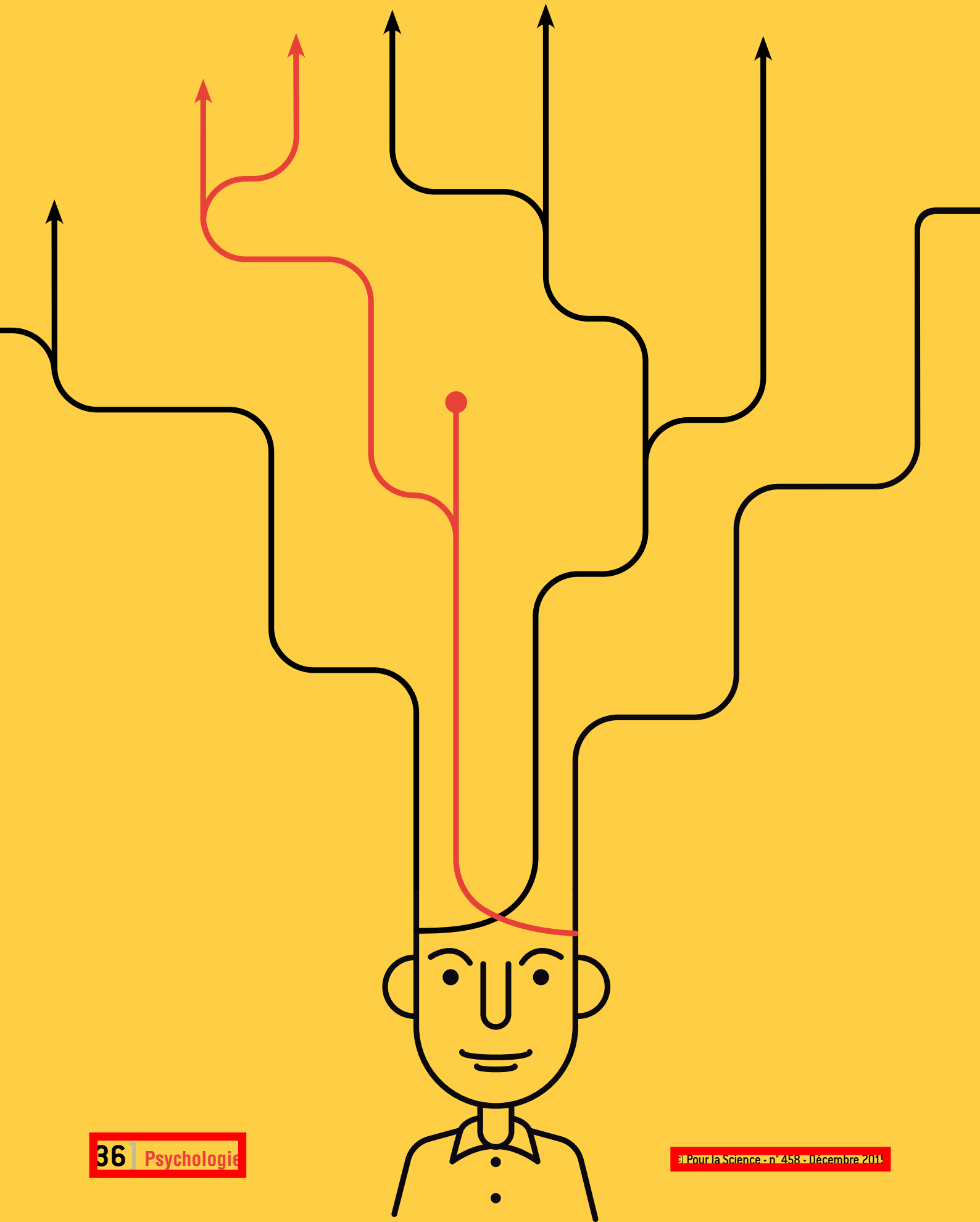
Quant aux autres espèces humaines, leurs membres n'étaient pas capables de s'allier avec la même efficacité, tandis que leurs armes de jet étaient probablement moins performantes. Déclassés, ils n'eurent aucune chance face à la déferlante des *H. sapiens*. Les anthropologues débattent depuis longtemps des raisons de la disparition des Néandertaliens. L'explication la plus troublante me semble être également la plus vraisemblable : les Néandertaliens ont été perçus par les hommes modernes comme des concurrents qu'il fallait éliminer…

Il m'arrive d'imaginer comment a pu se dérouler la fatidique rencontre des hommes modernes et des Néandertaliens. Je me représente des chasseurs réunis autour du feu se racontant avec force vantardise leurs combats héroïques contre des ours des cavernes ou des mammouths. Un jour cependant, ces récits prirent un tour plus sombre, voire terrifiant : ils témoignaient de l'arrivée d'une nouvelle population d'individus rapides et ingénieux, capables de projeter avec force et précision des lances à des distances incroyables. Ces étrangers venaient même la nuit en grand nombre massacrer les hommes et les enfants et emmener les femmes.

La triste histoire de la disparition des Néandertaliens, premières victimes de l'ingéniosité et de l'esprit coopératif des hommes modernes, explique en partie les trop fréquents génocides survenant au sein de notre humanité actuelle. Quand les ressources ou les terres disponibles se raréfient, nous dénommons « les autres » ou « ces gens-là » ceux qui ne nous ressemblent pas ou qui parlent une autre langue. Nous voyons ensuite dans ces différences des raisons de rejeter ou, pire, d'exterminer des humains.

La science a identifié les stimuli qui déclenchent cette tendance à classer des gens comme « autres » et à les traiter de façon horrible. Mais le fait qu'*H. sapiens* ait évolué pour réagir à la pénurie de cette façon impitoyable pour ses concurrents ne signifie pas que cela doive continuer. La culture peut prendre le dessus, même sur les instincts les plus forts. J'espère que la prise de conscience des racines anciennes de l'agressivité que nous développons à l'égard des autres en cas de pénurie nous permettra de suivre enfin la plus importante de toutes les sagesses héritées de l'expérience de nos ancêtres : « Plus jamais ça. » ■





POURQUOI les bonnes idées tuent les meilleures

Lorsque nous devons résoudre un problème, nous tendons à le faire par les moyens qui nous sont familiers. Cette attitude mentale nous empêche de voir les nouvelles solutions possibles qui, parfois, sont bien meilleures.

Merim Bilalić et Peter McLeod

Connaissez-vous l'*Einstellung* ? Littéralement, ce mot allemand se traduit par « réglage », mais en psychologie sociale, c'est un concept : celui d'« attitude mentale » ou encore d'« état d'esprit ». L'*Einstellungseffekt* – ou « effet d'attitude », voire en jargon de chercheur « effet d'Einstellung » – désigne la tendance humaine à s'accrocher à une solution compliquée déjà expérimentée, même si une solution plus simple existe. Le pionnier de l'étude de cet effet est le psychologue Abraham Luchins, qui fut l'un des héritiers américains du passage massif outre-Atlantique, à l'époque nazie, des écoles allemandes de psychologie.

Depuis Luchins, nombre de psychologues ont prolongé son travail en menant des expériences déclenchant l'effet d'attitude. Toutefois, aucun n'a réussi à montrer pourquoi il apparaît. Nous l'avons fait en suivant les mouvements des yeux de joueurs d'échecs de haut niveau et, par là, leurs processus mentaux. Nous avons ainsi mis en évidence qu'une personne subissant l'effet d'attitude tend à ignorer certains détails, qui pourraient la mener à une solution plus efficace. Ce résultat est important, car un travail récent suggère que de nombreux biais cognitifs mis en évidence par les psychologues au cours des ans sont en fait des variantes de l'effet d'attitude.

C'est dans une expérience classique de 1942 que Luchins a mis l'effet d'attitude en évidence. Il demanda à des volontaires de résoudre un problème élémentaire d'arithmétique : préparer un volume de 100 unités d'eau à l'aide de contenants de 21, 127 et 3 unités d'eau. Les participants étaient libres d'utiliser chaque récipient autant de fois qu'ils le souhaitaient, mais en le remplissant à ras bord. La solution est

simple : remplir le pot de 127 unités, puis se servir de son contenu pour remplir une fois celui de 21 unités, puis deux fois celui de 3 unités (car $100 = 127 - 21 - 2 \times 3$). Ce problème résolu, Luchins demanda aux participants de résoudre d'autres petites énigmes pouvant toutes être résolues aussi en trois étapes comparables. Ils les résolvèrent tout aussi facilement…

Une fois tout cela accompli, Luchins confronta les participants à une nouvelle énigme : produire un volume de 20 unités à partir de trois récipients de 23, 49 et 3 unités. Ce problème est en fait plus simple, puisqu'il suffit de remplir le premier pot et d'en vider une partie dans le troisième, ce qui revient à mettre en pratique la soustraction $23 - 3 = 20$. Curieusement, nombre de participants continuèrent à procéder en trois étapes ou plus. Ils vidèrent une partie du récipient de 49 unités dans le premier, puis deux fois dans le troisième, ce qui revient à effectuer la soustraction $49 - 23 - 3 - 3 = 20$… Et quand Luchins leur présenta un cas à résoudre en deux étapes – mais ne pouvant être résolu en trois ou plus –, ils abandonnèrent, déclarant le problème insoluble…

Cette expérience est l'une des plus célèbres illustrations de l'effet d'attitude. Très commune, cette tournure d'esprit a l'avantage de nous rendre efficaces. Il ne semble guère important en effet d'essayer toute une gamme de techniques chaque fois que l'on épluche une gousse d'ail. La solution trouvée la première fois est en général assez bonne. Ce raccourci cognitif nous évite de perdre du temps à innover chaque fois que nous entreprenons une tâche. Il a cependant l'inconvénient de nous aveugler quant à l'existence de solutions plus efficaces ou mieux adaptées.

Les joueurs d'échecs à l'étude

Depuis le début des années 1990, les psychologues cherchent à en apprendre plus sur l'effet d'attitude en impliquant des joueurs d'échecs de différents niveaux dans des expériences conçues pour qu'il joue un rôle. Dans ce type d'expériences, les chercheurs présentent aux joueurs différents arrangements de pièces sur un échiquier et leur demandent de mater en aussi peu de coups que possible. Dans nos expériences, par exemple, nous avons proposé à des joueurs aguerris des scénarios où ils pouvaient opérer un « mat à l'étouffée ». Dans cette séquence classique en cinq coups, la dame est sacrifiée pour attirer l'une des pièces de l'adversaire sur une case bien précise, coup qui prévient toute fuite du roi *(voir l'encadré pages 40 et 41)*. Toutefois, un mat en trois coups était aussi possible, mais par une séquence bien moins familière. Comme dans les expériences de pots d'eau de Luchins, la plupart des joueurs n'ont pas décelé la solution la plus efficace.

Au cours de certaines de ces expériences, nous avons demandé aux joueurs ce qui leur traversait l'esprit. Ils nous ont indiqué avoir trouvé comment opérer le mat à l'étouffée et avoir aussi cherché une solution plus efficace, mais sans succès. Toutefois, ces rapports verbaux ne suffisaient pas à mettre en évidence les raisons de cet insuccès. C'est pourquoi, en 2007, nous en sommes venus à employer une méthode plus objective : l'oculométrie, c'est-à-dire le suivi par caméra infrarouge des mouvements oculaires.

Le mat à l'étouffée et rien d'autre

Notre objectif ? Identifier quelles parties de l'échiquier les joueurs regardaient et pendant combien de temps. À partir de cela, nous avons retracé quels aspects du problème à résoudre étaient examinés avec attention ou au contraire ignorés. Nous avons ainsi suivi le regard de cinq joueurs d'échecs de haut niveau pendant qu'ils étudiaient une situation pouvant conduire à un mat à l'étouffée ou à un mat au bout de trois coups. Après 37 secondes d'examen en moyenne, tous les joueurs sont parvenus à la conclusion que le moyen le plus rapide de passer de l'arrangement de pièces en question à un mat consistait à rechercher un mat à l'étouffée. Lorsque, en revanche, nous les avons confrontés à un arrangement des pièces ne pouvant conduire au mat que par une seule séquence de trois coups, ils l'ont trouvée sans problème.

Et quand nous avons révélé à ces joueurs qu'un mat en trois coups était possible à partir de l'arrangement qui les avait orientés vers un mat à l'étouffée, ils étaient choqués. « Impossible, s'est exclamé l'un d'entre eux. Vous me parlez d'un arrangement de pièces différent, c'est évident. J'aurais remarqué une solution aussi simple. » La possibilité du mat à l'étouffée avait masqué les autres solutions dans son esprit. L'effet d'attitude avait été assez puissant pour

L'ESSENTIEL

- L'effet d'attitude est la tendance du cerveau à se fixer sur la solution la plus familière d'un problème tout en ignorant obstinément les autres solutions.
- Ce phénomène est connu depuis les années 1940, mais vient seulement d'être bien compris.
- En suivant les regards de joueurs d'échecs à l'aide d'une caméra, des psychologues ont montré qu'une fois soumis à l'effet d'attitude, les joueurs deviennent aveugles à toute solution non familière.
- L'effet d'attitude intervient très souvent

LES AUTEURS





Merim BILALIĆ est professeur de science cognitive à l'université de Klagenfurt, en Autriche, et chercheur à l'université de Tübingen, en Allemagne.

Peter McLEOD, du Queen's College à Londres, préside la fondation d'Oxford pour les neurosciences théoriques et l'intelligence artificielle.

ramener momentanément le niveau d'un maître d'échecs à celui d'un joueur commun.

Notre système de suivi du regard par caméra infrarouge a révélé que les joueurs ne détournent pas réellement leur regard des cases clés dans le mat à l'étouffée, même lorsqu'ils disent rechercher une solution rapide et pensent sincèrement le faire.

Quand, en revanche, ils sont confrontés à l'arrangement ne pouvant pas conduire à un mat à l'étouffée, mais pour lequel il existe une solution en trois coups, les mêmes commencent par regarder les cases et les pièces jouant un rôle important dans le mat à l'étouffée, puis, ayant réalisé que celui-ci ne marchera pas, dirigent leur attention vers les autres cases et découvrent vite la séquence gagnante en trois coups.

Récemment, Heather Sheridan, de l'université de Southampton en Angleterre, et Eyal Reingold, de l'université de Toronto, ont publié des recherches corroborant nos expériences d'oculométrie. Ces chercheurs ont présenté deux positions différentes à dix-sept joueurs d'échecs novices et à dix-sept maîtres d'échecs.

Dans l'un des scénarios, un mat bien connu comme le mat à l'étouffée était possible en suivant une séquence familière, laquelle était cependant moins rapide qu'une autre séquence moins évidente. Dans la seconde situation, la même séquence familière était en fait une erreur à ne pas commettre. Comme dans nos expériences, les joueurs confrontés à la possibilité de dérouler la séquence familière s'y sont accrochés, de sorte que leurs yeux ont peu divagué sur les cases jouant un rôle dans la séquence moins évidente. En revanche, quand la séquence familière constituait l'erreur à ne pas commettre, tous les maîtres et la plupart des novices ont détecté la solution moins évidente.

L'effet d'attitude n'est en aucune façon limité à des expériences de laboratoire ou même à des jeux mentalement exigeants comme les échecs. Il est au contraire très présent et induit de nombreux biais cognitifs. Dans son ouvrage *Novum Organum*, paru en 1620, le philosophe anglais Francis Bacon est magnifiquement éloquent quant à ce phénomène : « Quand il a adopté autrefois une opinion (reçue ou agréable), l'esprit humain pousse tout le reste à la confirmer et à la conforter. Et même s'il existe un plus grand nombre de raisons de poids d'aller à l'opinion opposée, il les néglige ou les dédaigne, ou bien par quelque distinction, les met de côté pour les rejeter […] Les hommes […] prêtent attention aux événements qui les satisfont, mais quand ce n'est pas le cas, et bien que cela arrive plus souvent, ils les négligent et les ignorent. Subtilement, cette forme de bêtise s'insinue en philosophie et dans les sciences, dans lesquelles la première conclusion ramène à elle-même tout ce qui l'a suivie et met en conformité avec elle-même tout ce qui vient après pourtant bien plus solide et meilleur. »

Dans les années 1960, le psychologue anglais Peter Wason nomma cette tendance « biais de confirmation ». Au cours d'expériences contrôlées, il montra que même lorsque quelqu'un essaie de tester une théorie d'une manière objective, il tend à rechercher les preuves confirmant ses idées et à ignorer celles qui les contredisent.

Dans *The Mismeasure of Man* (*La mal-mesure de l'homme*), par exemple, le paléontologue et essayiste américain Stephen Jay Gould a réanalysé les données rassemblées au XIX^{e} siècle par des savants qui ont tenté d'estimer l'intelligence de différents groupes raciaux, de classes sociales et des sexes en faisant l'hypothèse qu'elle serait corrélée avec la taille du cerveau.

D'énormes distorsions de données

Gould a mis en évidence d'énormes distorsions dans les données employées. Ainsi, quand le neurologue français Paul Broca découvrit que le cerveau des Français était plus petit en moyenne que celui des Allemands, il expliqua que cette différence anatomique résultait de la différence entre les tailles moyennes des citoyens dans ces deux nations. Pouvait-il admettre que les Français étaient moins intelligents que les Allemands ? Non ! Cependant, quand il s'aperçut que le cerveau féminin était plus petit en moyenne que le cerveau masculin, il ne l'expliqua pas par la différence de taille moyenne entre hommes et femmes. L'idée que les femmes seraient moins intelligentes que les hommes ne le dérangeait pas…

Étonnamment, Gould écrit dans son livre qu'au contraire de ce que nous

L'effet d'attitude induit de nombreux biais cognitifs

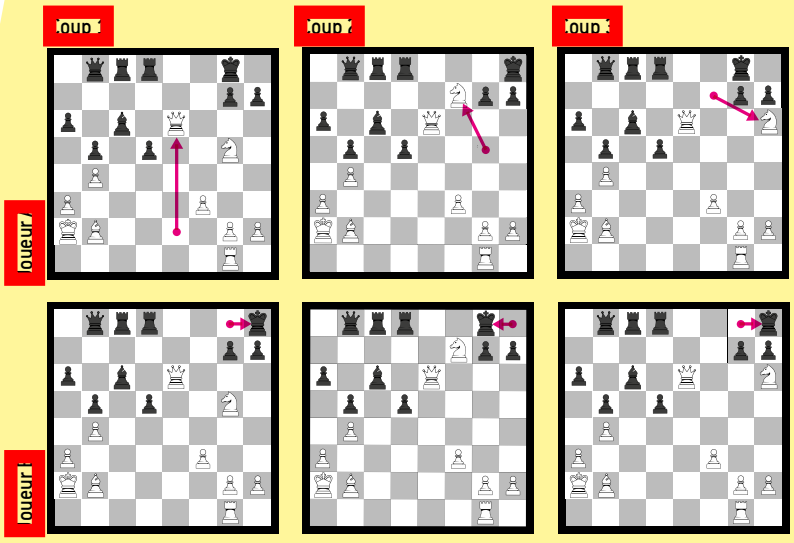
BIBLIOGRAPHIE

M. Bilalić *et al.*, **Why good thoughts block better ones: the mechanism of the pernicious Einstellung (Set) effect**, *Cognition*, vol. 108, n° 3, pp. 652-661, 2008.

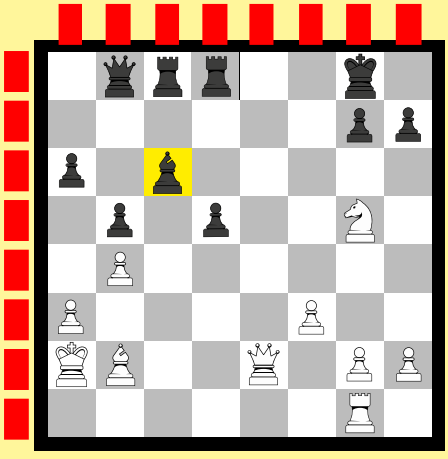
H. Sheridan et E. M. Reingold, **The mechanism and boundary conditions of the Einstellung effect in chess: Evidence from eye movements**, PLOS ONE, vol. 8, n° 10, article n° e75796, 2013.

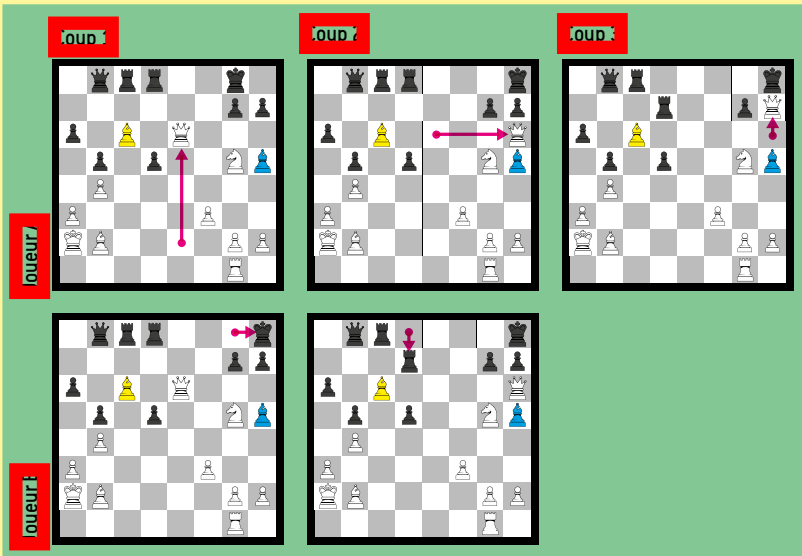
Jeu mentalement exigeant, les échecs se sont révélés très utiles pour étudier l'effet de l'attitude, c'est-à-dire la tendance du

familières d'un problème plutôt qu'à en rechercher d'autres éventuellement meilleures. Des expériences ont montré que ce biais cognitif change la façon dont le regard de joueurs d'échecs experts ou novices parcourt l'échiquier.

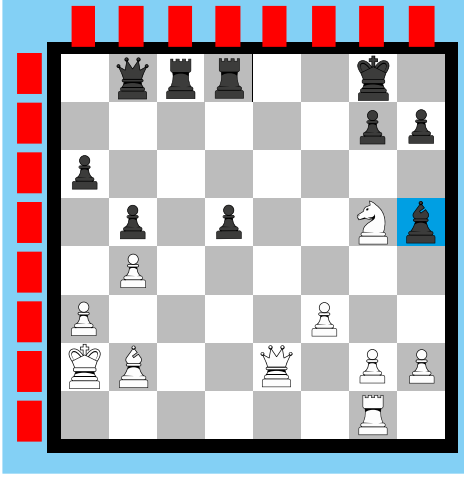


Problème à deux solutions



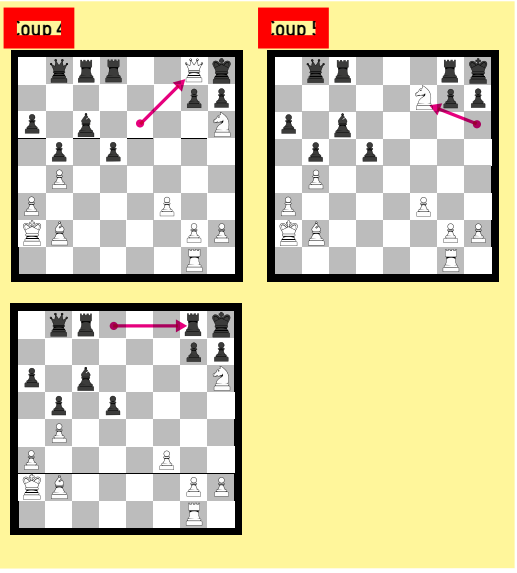


Problème à solution unique



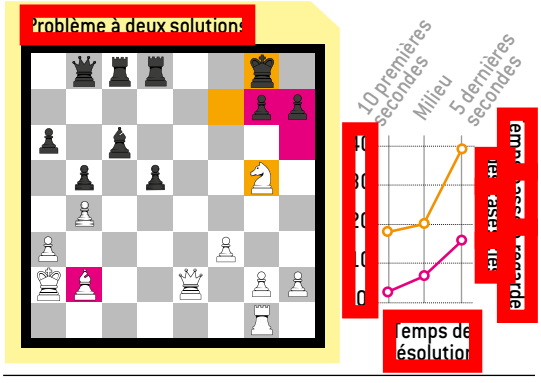
QUAND UN MAITRE D'ECHECS NE VOIT PAS LA MEILLEURE STRATEGIE

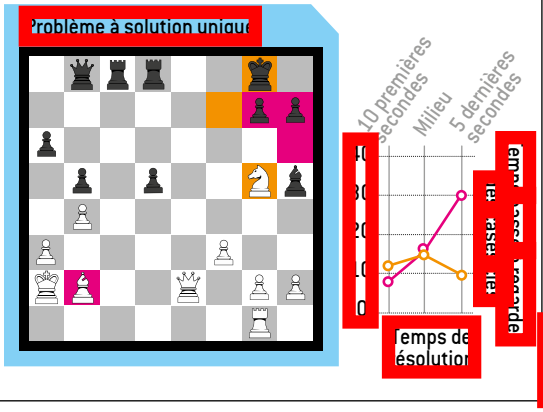
Dans le mat à l'étouffée, une séquence gagnante connue de cinq coups *(en jaune)*, le joueur A déplace sa dame de E2 vers E6, refoulant le roi du joueur B dans un coin de l'échiquier (en H8). Le joueur A met ensuite à deux reprises le roi de B en échec avec un cavalier, forçant le joueur B à déplacer son roi. Consentant un sacrifice délibéré, le joueur A déplace sa dame sur la case adjacente au roi de B, de sorte que celui-ci la prend avec une tour. Le joueur A déplace alors son cavalier en F7, ce qui met son adversaire mat. « Étouffé » par ses propres pièces, le roi B n'a en effet plus de fuite possible. Des psychologues ont confronté des maîtres d'échecs avec le problème représenté ci-dessus, lequel peut être résolu soit par un mat à l'étouffée, soit par une séquence gagnante de trois coups *(en vert)*. Or les joueurs deviennent incapables de remarquer la stratégie gagnante efficace quand ils se sont aperçus que la séquence familière du mat à l'étouffée est praticable. Quand on les confronte à un échiquier presque identique, où le déplacement du fou B en H5 *(en bleu)* a éliminé la possibilité d'un mat à l'étouffée, les mêmes joueurs repèrent beaucoup mieux la séquence gagnante.



EXPLICATION DE L'EFFET : LA VISION TUNNEL

L'analyse des mouvements oculaires a révélé que dès que les joueurs savent qu'un mat à l'étouffée est possible, ils passent plus de temps à regarder les cases en rapport avec cette séquence connue *(orange)* que les cases en rapport avec une séquence gagnante de trois coups, plus efficace *(magenta)*. Or ils se disent à la recherche d'une solution alternative... Inversement, s'ils réalisent le mat à l'étouffée impossible, leur regard se portera plus sur les zones cruciales pour mettre en œuvre la séquence gagnante efficace.





pourrions penser, Broca et ses confrères n'étaient pas malhonnêtes intellectuellement : « Nous pouvons être à peu près certains que les biais évoqués dans ce livre [...] n'ont joué de rôle important qu'inconsciemment tant les chercheurs qui les avaient étaient persuadés d'être en train d'établir une vérité sans tache ». Tout comme nous l'avons observé dans nos expériences à base de problèmes d'échecs, le confort des idées familières a empêché Broca et ses contemporains de percevoir les erreurs qu'ils commettaient dans leurs raisonnements.

On voit bien là le danger de l'effet d'attitude : nous croyons avoir un esprit ouvert et dénué d'idées préconçues, mais ne réalisons pas que notre cerveau sélectionne pour les éloigner de notre attention tous les détails de notre environnement qui pourraient nous porter vers de nouvelles idées. Toutes les informations qui n'entrent pas dans la solution ou la théorie auxquelles nous sommes accrochés sont ignorées ou éliminées.

La discrétion du biais de confirmation a des conséquences regrettables dans la vie sociale, comme le montre l'étude de la prise de décision médicale ou judiciaire. Dans un article sur les erreurs médicales, le médecin américain Jerome Groopman note que dans la plupart des cas, « les médecins n'avaient pas commis d'erreur de diagnostic en raison de leur ignorance des faits cliniques, mais parce qu'ils étaient tombés dans des pièges cognitifs ».

Ainsi, quand un médecin reçoit un patient adressé par un confrère, le diagnostic déjà posé par le premier clinicien peut l'empêcher d'apercevoir des détails importants le contredisant. Il lui est plus facile d'accepter le diagnostic de son confrère – la « solution » déjà devant lui – que de réexaminer de près toute la situation.

De même, face à une radiographie du thorax, les radiologues, une fois qu'ils ont noté une première anomalie, se concentrent dessus et ne perçoivent plus d'éventuels autres symptômes, comme par exemple une grosseur pouvant indiquer la présence d'une tumeur. Si, en revanche, ces symptômes se présentent en premier sur la radio, les radiologues les voient d'emblée.

De même, des recherches ont révélé que les jurés décident de l'innocence ou de la culpabilité de quelqu'un bien avant que l'ensemble de l'affaire leur ait été présenté. Leur impression initiale de l'accusé change non seulement leur évaluation des indices de culpabilité, mais aussi la mémoire qu'ils en ont. On a aussi mis en évidence que si un recruteur trouve un candidat physiquement attrayant, il tendra à percevoir bien plus positivement sa personnalité et son intelligence ; l'inverse étant aussi vrai. Tous ces biais sont des conséquences de l'effet d'attitude. Pour juger quelqu'un, il est plus facile de coller à une vision cohérente préétablie que de trier une foule d'indices contradictoires.

Peut-on résister à l'effet d'attitude ? Peut-être. Selon nos expériences sur les joueurs d'échecs et selon celles de Heather Sheridan et d'Eyal Reingold qui les ont suivies, certaines personnes exceptionnellement expertes parviennent à déceler une solution optimale peu évidente, même quand une séquence de coups plus longue mais familière est aussi possible. Cela suggère que plus une personne est experte dans son domaine – qu'il s'agisse d'échecs, de science ou de médecine – plus elle sera apte à résister aux biais cognitifs.

Personne n'est épargné

Toutefois, personne n'est épargné. Même les grands maîtres d'échecs échouent à déceler la solution cachée si nous parvenons à en rendre la perception assez difficile. Se souvenir que l'on est soumis à l'effet d'attitude aide à y résister. Supposez, par exemple, que vous soyez en train d'examiner la contribution au réchauffement climatique des gaz à effet de serre d'origine humaine pour vous forger une opinion sur cette menace. Lors d'un tel examen, il est essentiel de se souvenir que si vous pensez connaître la réponse d'avance, vous ne pourrez juger de façon objective. Sans cette prise de conscience, vous aurez tendance à renforcer votre opinion.

Nous devons essayer de prendre conscience de nos faiblesses cognitives et de les accepter. Charles Darwin avait trouvé une technique remarquablement simple et efficace à cet égard, qu'il décrit ainsi dans son *Autobiographie* : « J'ai pendant des années suivi une règle d'or : si je croisais un fait publié, une nouvelle observation ou une idée allant à l'encontre de mes résultats, j'en dressais sans faute et immédiatement un mémorandum. Car je savais d'expérience que ces faits et pensées-là, bien plus que les faits favorables, ont tendance à être oubliés. » ■

Mille ans de variations climatiques en Antarcti



SI DE SOMPTUEUX ICEBERGS
brillant au soleil vous accueillent
sur les rivages de l'Antarctique,
c'est sur les vastes étendues
blanches de la calotte polaire
que les climatologues effectuent
leurs mesures, parfois
sous la tempête.

que

Anaïs Ors

En lisant dans la neige ancienne l'histoire du climat en Antarctique sur le dernier millénaire, les climatologues ont montré qu'il a subi plusieurs réchauffements, et que le dernier est de nature différente des précédents.

L'ESSENTIEL

- Pour saisir l'importance d'un événement climatique, il faut le replacer dans une histoire plus longue.
- Le réchauffement actuel n'échappe pas à cette remise en contexte.
- Comprendre les causes du petit âge glaciaire, période froide entre 1400 et 1850, est ainsi une étape indispensable.
- L'étude de l'évolution du climat sur le dernier millénaire en Antarctique a apporté des réponses.
- Elle suggère aussi que, en Antarctique, le réchauffement actuel est différent des précédents.

Juillet 2011. Ma mission au NEEM (*North Greenland Eemian Ice Drilling*), un forage profond dans la glace au nord du Groenland, touche à sa fin. Nous chargeons l'avion, un LC-130 de la Garde nationale des États-Unis équipé de skis pour atterrir sur la neige, et nous tentons de décoller pour Kangerlussuaq, l'aéroport international du Groenland. Décollage impossible : il fait trop doux, la neige est molle et l'avion n'arrive pas à accélérer. Du jamais vu à cette latitude. L'année suivante, il y aura même de la pluie au NEEM, au cours d'une vague de chaleur sans précédent dans la mémoire collective.

Est-ce notre mémoire qui est trop courte ou le climat qui se transforme ? Un événement climatique, même récurrent sur plusieurs années, ne suffit pas pour répondre. Ce n'est pas parce que, deux années de suite, une vague de chaleur envahit le Groenland en été que le phénomène est une manifestation du changement climatique actuel. Pour comprendre l'importance d'un événement, il est indispensable de le replacer dans une histoire plus longue du climat, c'est-à-dire dans l'échelle de temps qui lui correspond : dix ans, un siècle, un millénaire… Seulement alors peut-on distinguer les variations habituelles du climat, auxquelles les écosystèmes sont adaptés, et les variations exceptionnelles, qui peuvent causer des changements profonds.

Le réchauffement climatique actuel n'échappe pas à cette remise en contexte. Aussi, tandis que la COP21 – la Conférence des Nations unies sur les changements climatiques – s'apprête à se réunir à Paris fin novembre pour définir le nouvel accord international en vue de limiter ce réchauffement, les recherches se poursuivent sur le terrain dans le monde entier afin de suivre l'évolution du climat actuel, mais aussi et surtout de se donner les moyens de replacer les événements climatiques dans des échelles de temps pertinentes. C'est ainsi que je me suis retrouvée, pendant ma thèse de doctorat, à mesurer des températures dans des trous de forage par –20 °C… en Antarctique. Ces mesures ont fourni des informations précieuses non seulement sur l'évolution passée du climat dans la région, mais aussi sur les causes des divers réchauffements qui s'y sont produits ce dernier millénaire.

Une thèse sur une carotte

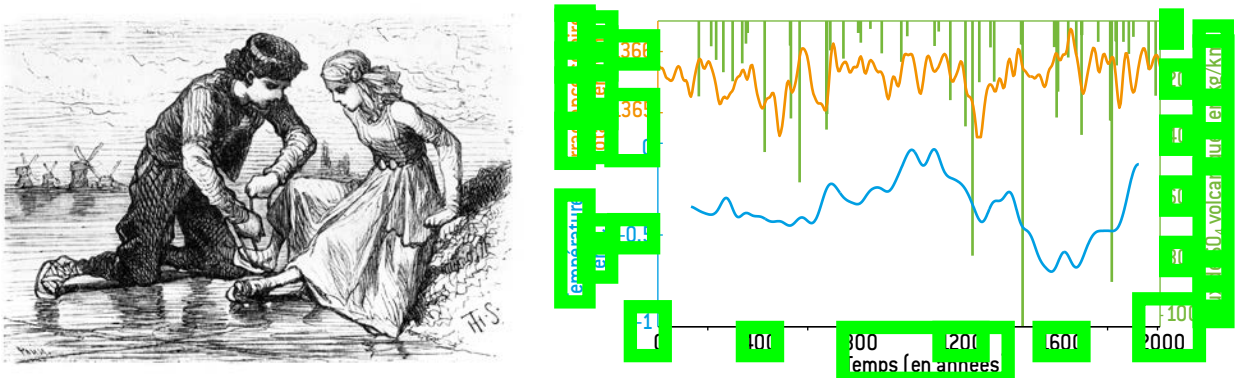
« Quoi ? Une thèse ? Mais la recherche, c'est pour les asociaux, et toi tu aimes parler aux gens… » Premier défi : combattre les idées reçues, convaincre mes proches que faire une thèse est une bonne idée. Non, la recherche n'est pas réservée aux asociaux, elle concerne les personnes curieuses, celles qui veulent comprendre le monde, qui ne peuvent pas éteindre la petite voix qui sans cesse interroge : « Pourquoi ? Comment ? »

Second défi : partir à l'étranger. La recherche se faisant en anglais, je choisis de faire ma thèse dans un pays anglophone, pour assurer ma maîtrise de la langue. Je pars donc en septembre 2005 à San Diego, en Californie, dans un programme d'océanographie.

Le système américain est différent du système français. Le programme de doctorat dure de cinq à sept ans. La première année est une année de cours et de découverte : les étudiants, qui viennent principalement des matières fondamentales (mathématiques, physique, chimie), s'initient alors à l'océanographie ou à la climatologie. Puis vient le choix de l'équipe de recherche et du sujet. Le choix d'un sujet de thèse est toujours le résultat d'un mélange d'envies et d'occasions. Jeff Severinghaus, qui deviendra mon directeur de thèse, me propose un sujet large, sur une nouvelle carotte de glace dont le forage débute à peine en Antarctique. Il y aura des missions de terrain, de la géochimie isotopique en laboratoire, de la modélisation numérique. À moi d'orienter le sujet dans le détail, quand je me serai familiarisée avec les bases, et de me présenter devant un jury en troisième année, lors du *qualifying exam*.

Le contexte de la thèse, lui, est en revanche bien défini : il s'agit de quantifier la variabilité du climat à différentes échelles de temps, de la dizaine d'années au millénaire. Les climatologues observent que la température moyenne de la Terre augmente depuis environ 150 ans et que ce réchauffement s'est accéléré au cours des 50 dernières années. Mais pour comprendre l'importance de cette tendance, il

LA SIGNATURE DU PETIT AGE GLACIAIRE



Entre 1400 et 1850, l'hémisphère Nord a subi une période froide – nommée aujourd'hui le petit âge glaciaire – relatée dans nombre de peintures et écrits de l'époque, tels que les peintures des Brueghel. Ainsi, une illustration du conte *Les Patins d'argent*, écrit par Mary Mapes Dodge au milieu du XIX[e] siècle, montre la vie en Hollande au début du siècle, quand les canaux gelaient en hiver, ce qui n'arrive plus de nos jours *(à gauche)*. La reconstruction de l'évolution du climat de l'hémisphère Nord pendant les 2 000 dernières années confirme cette période froide *(à droite)*. Elle est associée à une baisse de la température moyenne *(en bleu)*, à des périodes de faible intensité solaire *(en orange)* et à un volcanisme explosif fréquent *(en vert)*.

aut prendre du recul et la comparer avec es variations du climat sur un intervalle de emps bien plus long que 150 ans. Concrè- ement, cela signifie évaluer la température le la planète sur au moins 1 000 ans, quan- ifier l'amplitude des variations du climat ur cette échelle de temps, puis replacer e réchauffement récent dans ce contexte. ar exemple, si je mesure la température Paris entre août et décembre, je peux n conclure que Paris se refroidit, mais si e continue ma mesure sur une ou deux nnées, je comprendrai que cette tendance, d'une amplitude d'environ 20 °C, fait partie d'un cycle plus long et que la décroissance de la température entre août et décembre s'inscrit dans ce cycle naturel et n'a donc rien d'anormal. En revanche, seulement 5 °C nous séparent du dernier maximum glaciaire, il y 20 000 ans, mais cet écart est ignificatif sur les 100 000 der- nières années.

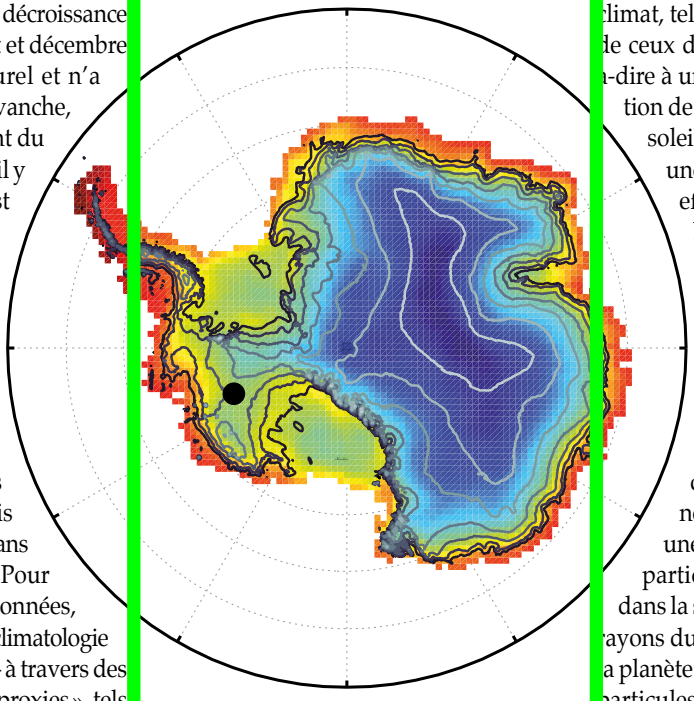
Malheureusement, nos ncêtres n'ont pas toujours mesuré la température à l'en- droit où ils habitaient ou, s'ils l'ont fait, ils ont négligé de nous en informer. Nous n'avons de relevés fiables des températures que depuis environ 1850, et seulement dans certaines régions du globe. Pour remédier à ce manque de données, nous avons recours à la paléoclimatologie – l'étude des climats passés – à travers des ndices que nous appelons « proxies », tels que l'épaisseur des cernes d'arbres ou la composition des carottes de glace. Chaque proxy étant propre à une région du globe, c'est en combinant l'information recueil- ie en différents endroits que l'on perçoit l'importance d'un changement climatique.

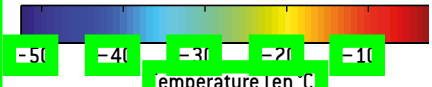
En effet, le climat varie non seulement dans le temps, mais aussi dans l'espace. Cer- aines différences spatiales sont constantes dans le temps : il fait en général plus chaud Marrakech qu'à Brest. Parfois aussi, une nomalie de température se manifeste de façon inversée dans deux endroits du globe. C'est le cas, par exemple, avec l'oscillation nord-atlantique, qui connaît deux phases : la phase positive, durant laquelle les tempêtes sont déviées vers le nord de l'Europe, et la phase négative, durant laquelle elles sont déviées vers le sud. Durant sa phase posi- ive, le sud de l'Europe est sec tandis que a Scandinavie est anormalement chaude

L'AUTEURE



Anaïs Orsi effectue un postdoctorat au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (UMR8212 CNRS/CEA/UVSQ), à l'institut Pierre Simon Laplace, à Gif-sur-Yvette. En 2014, elle a été lauréate du prix *Le Monde* de la recherche universitaire.





ACTUELLEMENT, EN ANTARCTIQUE, la température annuelle à la surface varie entre – 50 °C *(en bleu, au centre)* et 0 °C *(en rouge, sur la côte)*. À WAIS Divide *(point noir)* où l'auteure a effectué ses missions, la température varie de – 12 °C en été (austral) à – 50 °C en hiver.

et humide, et inversement. Dans ce cas, un changement de climat local est compensé par un changement opposé ailleurs, sans qu'il y ait d'incidence sur le climat planétaire. En pratique, on ne peut mesurer que le climat local. Il est donc indispensable de mesurer la température en de nombreux endroits du globe pour détecter les tendances significatives.

De plus, la distribution spatiale d'une anomalie climatique nous renseigne aussi sur le mécanisme qui en est la cause. En particulier, elle aide à distinguer les événements dus à la variabilité interne du climat, telle l'oscillation nord-atlantique, de ceux dus à un forçage externe, c'est-à-dire à un phénomène tel qu'une variation de l'insolation (l'énergie reçue du soleil), une éruption volcanique ou une variation de la teneur en gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

La variabilité interne s'apparente à des remous dans la baignoire et ne change pas la moyenne globale du climat. Le forçage externe, en revanche, a une incidence sur le climat moyen mondial : il s'apparente à un changement du niveau de l'eau dans la baignoire. Par exemple, nous savons maintenant qu'après une forte éruption volcanique, des particules de sulfate sont déposées dans la stratosphère, ce qui réfléchit les rayons du Soleil et refroidit notablement la planète pendant environ deux ans. Les particules finissent par tomber et l'effet cesse alors.

L'énigme du petit âge glaciaire

Pourquoi s'intéresser en particulier à l'Antarctique ? À cause… du « petit âge glaciaire », une période qui s'étend de la fin du Moyen-Âge au début de l'ère industrielle et durant laquelle les hivers ont été particulièrement rigoureux.

Le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) a montré que notre climat se réchauffe et que ce réchauffement touche toutes les régions du globe. Ce n'est donc pas juste un remous dans la baignoire, mais une tendance significative. Le rapport du GIEC de 2013 précise : « Chacune des trois dernières décennies a été successivement plus chaude à la surface de la Terre que toutes

es décennies précédentes depuis 1850. Les années 1983 à 2012 constituent probablement la période de 30 ans la plus chaude qu'ait connue l'hémisphère Nord depuis 1 400 ans. » En d'autres termes, le réchauffement des 30 dernières années est significatif par rapport à la période qui correspond à l'avancée industrielle de l'homme : de 1850 à aujourd'hui. Cependant, 1850 marque aussi la fin du petit âge glaciaire, une période de plus de 400 ans de climat froid qui n'est pas représentative du climat moyen sur les derniers millénaires et qui ne peut servir de référence. Le petit âge glaciaire est aussi le changement climatique le plus récent dans l'histoire du climat, et son étude nous permet de comprendre comment notre planète répond au changement.

Le petit âge glaciaire fait référence à la période 1400-1850 durant laquelle les hivers furent très rudes en Europe. Les peintures flamandes du XVII[e] siècle témoignent de canaux gelés en hiver aux Pays-Bas, ce qui n'arrive plus aujourd'hui. Des études compilant un grand nombre d'archives climatiques réparties sur l'hémisphère Nord montrent que plusieurs périodes froides se sont succédé pendant le petit âge glaciaire, la température étant alors de 1 °C inférieure en moyenne à celle de la période de référence 1960-1990 *(voir l'encadré page 44)*.

Bien que le petit âge glaciaire soit la période la plus récente de changement climatique notable, et donc la période pour laquelle nous avons la capacité d'obtenir la plus grande couverture spatiale de données paléoclimatiques, les causes du petit âge glaciaire ne sont pas entièrement élucidées. Cette période est associée à une diminution du rayonnement solaire, mais cette diminution est bien trop faible pour expliquer un refroidissement de 1 °C. Il doit donc exister des mécanismes amplificateurs du forçage solaire, mais ils ne sont pas clairement identifiés.

Le petit âge glaciaire est aussi associé à un volcanisme plus intense que celui des siècles précédents. Or le volcanisme explosif contribue au refroidissement du climat en voilant le ciel avec les particules relâchées dans l'atmosphère lors des éruptions. Cependant, cet effet ne dure qu'un ou deux ans. Il est donc difficile d'attribuer une période froide de 400 ans au forçage volcanique sans invoquer, là aussi, des mécanismes amplificateurs qui font durer la période froide jusqu'à l'éruption suivante. L'un de ces mécanismes est l'albédo (pouvoir réfléchissant) de la neige : pendant une année froide, la neige fond moins que les autres années en été, aussi le sol reste-t-il blanc au lieu d'être brun. Le blanc absorbant peu de rayonnement solaire, le sol se refroidit, ce qui permet à la neige de s'étendre encore davantage l'année suivante.

On a aussi suggéré que la diminution du rayonnement solaire n'était peut-être





qu'une coïncidence et que le petit âge glaciaire était en fait plutôt lié à une réduction de la circulation thermohaline qui amène, en surface, de l'eau chaude de l'hémisphère Sud vers l'hémisphère Nord et, en profondeur, de l'eau froide de l'hémisphère Nord vers l'hémisphère Sud. Si cette circulation se réduit, l'hémisphère Nord se refroidit tandis que l'hémisphère Sud se réchauffe. Il est donc possible de tester cette hypothèse en étudiant l'évolution de la température dans l'hémisphère Sud durant le petit âge glaciaire. S'il s'est réchauffé durant cette période, il est possible que la circulation thermohaline ait été responsable du petit âge glaciaire en Europe ; et s'il s'est refroidi autant que l'hémisphère Nord, il est possible que le rayonnement solaire ait été responsable du petit âge glaciaire.

Une façon de tester l'hypothèse du volcanisme et de l'albédo est de déterminer si le petit âge glaciaire était plus intense dans l'hémisphère Nord que dans l'hémisphère Sud : la surface continentale étant plus importante dans l'hémisphère Nord que dans l'hémisphère Sud aux moyennes latitudes, l'effet de l'enneigement prédit par cette hypothèse devrait être plus fort au Nord qu'au Sud.

D'où l'intérêt particulier pour l'Antarctique. Mon projet de thèse s'est focalisé sur la reconstruction de la température pendant le dernier millénaire en Antarctique Ouest, afin de mieux caractériser les mécanismes susceptibles de changer le climat et, notamment, de comprendre si le petit âge glaciaire résultait d'oscillations internes du climat ou d'une diminution du rayonnement solaire et d'une intensification du volcanisme à cette période.

Première expédition en Antarctique

Me voilà donc lancée dans la préparation d'une mission en Antarctique. Forer une carotte de glace nécessite un certain nombre de petites mains et il est de notoriété publique qu'un thésard dont les travaux dépendent de la qualité de la glace en prendra le plus grand soin. « Puisque tu pars, tu devrais en profiter pour mesurer la température dans le trou d'une carotte courte », me suggère Jeff. « Tu as deux mois pour te préparer avant qu'on envoie le cargo. » Deux mois pour comprendre de quoi il s'agit, dessiner, commander, fabriquer, tester, expédier. Les fiches techniques du matériel ne disent pas toujours si leur produit fonctionne correctement à –20 °C. Heureusement, je ne suis pas seule. Je peux faire appel à ceux qui ont déjà effectué ce type de mesures : « C'est bon, j'ai déjà testé le PVC, ça marche encore à –20 °C, tu peux sûrement te passer des câbles en silicone, bien plus chers. » Faire de la recherche, c'est aussi savoir profiter de l'expérience des gens qui nous précèdent.

Puis vient le moment de partir pour une mission de 65 jours, entre décembre 2007 et janvier 2008. Elle commence par un long voyage en avion, jusqu'à Christchurch, en Nouvelle-Zélande. Nous atteignons la base antarctique de McMurdo, sur l'île de Ross, et enfin notre camp de WAIS Divide (*West Antarctic Ice Sheet Divide*, pour Sommet de l'inlandsis Ouest-Antarctique), au centre de l'Antarctique Ouest, après avoir attendu plusieurs jours une fenêtre météorologique suffisamment clémente. Le site est plat et blanc à perte de vue. Chacun monte sa tente. Le soir, le vent se lève, balayant la neige. On ne voit presque rien :

– *Pardon, je viens d'arriver, les tentes sont de quel côté ?*





AU CAMPEMENT DE WAIS DIVIDE, dans l'Antarctique Ouest, chacun dort dans une tente individuelle avec, pour décor, l'étendue plate et blanche à perte de vue de l'inlandsis *(à gauche)*. La cantine est l'une des rares tentes chauffées. Les carottes forées dans la glace sont conservées dans un entrepôt creusé dans la glace et analysées dans une longue structure en forme d'arche *(au centre)*. Le personnel, le matériel et le ravitaillement sont acheminés par avion *(à droite)*.

– *Suis les fanions rouges.*

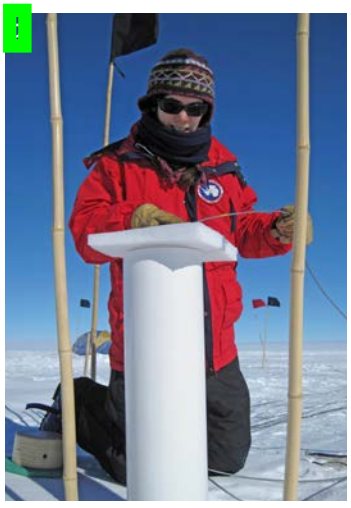
– *Je ne vois aucun fanion.*

– *Ah…*

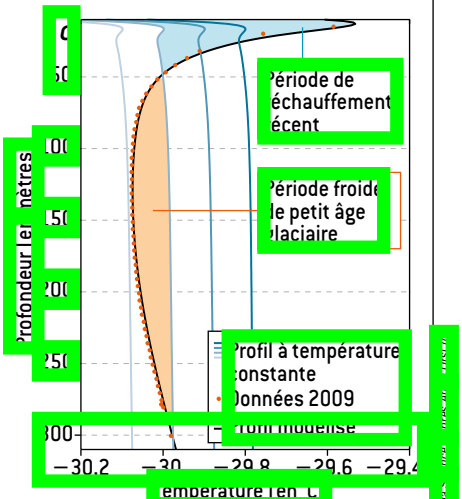
J'ai fini par trouver mon logis après une éclaircie, mais, le lendemain soir, tout le monde a dormi dans la tente de cuisine, parce que le vent était trop fort et la visibilité inférieure à deux mètres. Finalement, cette première expérience m'a vaccinée contre la peur des tempêtes : je n'en ai jamais connu d'aussi forte au cours des cinq autres expéditions auxquelles j'ai participé.

Au retour de cette première expédition, j'apprends la modélisation inverse non linéaire, qui me permettra de transformer ma courbe des températures en fonction de la profondeur en une histoire

MESURER LA TEMPÉRATURE DANS UN TROU DE FORAGE



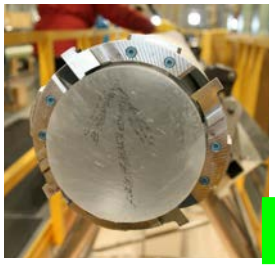




À cause de sa faible conductivité thermique, la neige garde en mémoire la température qu'il faisait lorsqu'elle était à la surface : la température met des centaines d'années à s'y homogénéiser. Ainsi, en mesurant la température de la neige dans un trou de forage avec un thermomètre précis – un thermistor, c'est-à-dire une résistance sensible à la température *(b)* –, l'auteure *(a*, ici ajustant la hauteur de la sonde thermique) a établi l'évolution de la température en fonction de la profondeur dans le trou *(c)*, qu'elle a ensuite traduite en évolution de la température entre le présent (*c*, *partie bleutée*) et le petit âge glaciaire (*c*, *partie orangée*). Les données mesurées en 2009 *(points orange)* étaient similaires à celles de 2008 *(non montrées)*. Le réchauffement de WAIS Divide depuis le petit âge glaciaire est ici bien visible.

Carotte de glace à WAIS Divide

Le forage d'une carotte de glace s'effectue à l'aide d'un carottier. Quatre couteaux, aiguisés comme des lames de rasoir, enlèvent la glace autour de la carotte. Puis un système agrippe la carotte à sa base. On la tire alors fort vers le haut pour la casser et la libérer. Le forage de WAIS Divide a permis d'obtenir une carotte de 3 405 mètres de longueur, couvrant les 68 000 dernières années avec une très haute précision.



de la température au cours du temps. En effet, la mesure de la température dans les trous de forage repose sur un principe simple : la glace, et plus encore la neige, sont de bons isolants thermiques. Comme la laine de verre dans nos maisons, la neige contient de l'air, qui conduit mal la chaleur. Cent ans après qu'elle a été enfouie, elle garde une mémoire de la température au moment où elle était à la surface. Ainsi, rien qu'en mesurant la température dans un trou laissé par le forage d'une carotte de glace, on peut voir la différence de température entre le présent et le dernier âge glaciaire. Dès lors, on remonte dans le temps lorsqu'on s'enfonce dans le trou. Un modèle numérique permet, à partir de l'observation (les variations de la température dans le trou de forage en fonction de la profondeur), de retrouver la cause (l'histoire de la température).

Lorsque je présente mes premiers résultats à la rencontre annuelle du groupe WAIS Divide, qui rassemble la vingtaine de laboratoires travaillant sur la carotte de glace, je suis confrontée au scepticisme naturel des experts : « Es-tu vraiment sûre d'obtenir une telle précision ? As-tu pensé au "bruit" causé par l'électricité statique ? Sans fluide dans ton trou, n'est-il pas possible que de l'air froid soit tombé au fond (l'air froid est plus dense que l'air chaud) et ait faussé tes mesures ? » Je prends note, je réponds de mon mieux, je planifie des tests supplémentaires. Toutes ces questions devront être résolues avant la rédaction d'une publication. Les congrès sont très utiles pour cela : ils nous offrent un regard extérieur sur notre travail, ce qui nous permet d'identifier les points d'amélioration.

Un coup de fi

En juillet, je reçois un appel téléphonique de Ken Taylor, le directeur du projet WAIS Divide : « Anaïs, j'ai besoin de toi. Joe devait prendre la direction scientifique du camp, mais sa femme est enceinte et il ne peut plus partir. Accepterais-tu de prendre sa place ? On partira mi-novembre pour trois mois. Je serai là les trois premières semaines pour t'aider, puis tu auras le champ libre. » Je repars, mais cette fois-ci, il me faudra diriger l'équipe scientifique : dix personnes, réparties en trois équipes travaillant à elles trois 24 heures sur 24, avec pour mission de réceptionner les carottes de glace, de faire les premières mesures scientifiques, puis d'empaqueter les carottes pour les rapporter aux États-Unis.

C'est l'occasion de me plonger dans la logistique des missions de terrain. Je peux aussi reproduire mes mesures de température et montrer aux sceptiques que l'air froid de l'hiver n'a aucune incidence sur mes résultats : les nouvelles mesures ont lieu en janvier 2009, pendant l'été austral, un an après ma première campagne. Si l'air froid de l'hiver austral (juillet 2008) s'est entre-temps engouffré dans le trou de forage, la température au fond du trou devrait être plus faible que celle de 2008, ce qui n'est pas le cas. Je prouve ainsi que mes mesures sont fiables et très précises, de l'ordre de 3 millièmes de degré à 300 mètres de profondeur. J'ai tous les éléments pour une première publication.

Mes mesures et le calcul numérique qui les accompagnent m'ont permis de démontrer deux choses. D'une part, il y a eu un épisode froid en Antarctique correspondant au petit âge glaciaire, ce qui est compatible avec l'hypothèse que le petit âge glaciaire est la conséquence d'un forçage externe, probablement d'origine solaire et volcanique, et non d'une redistribution de l'énergie entre l'hémisphère Nord et l'hémisphère Sud.

D'autre part, l'Antarctique Ouest s'est fortement réchauffé au cours des 50 dernières années – de 1,5 °C environ –, ce qui est surprenant. On pensait auparavant que le réchauffement climatique renforcerait les vents d'ouest qui tournent autour de l'Antarctique, ce qui aurait eu pour conséquence de refroidir le continent blanc en l'isolant des masses d'air chaud en provenance des basses latitudes. Cette hypothèse est probablement valide pour l'Antarctique Est, mais nos mesures montrent que l'Antarctique Ouest est sensible au changement climatique ressenti par le reste de la planète. On pense que ce réchauffement est lié à des changements des centres de convection dans l'océan Pacifique tropical, qui modulent la position de la basse pression sur la mer d'Amundsen, à l'ouest du continent.

Ce que disent les bulles

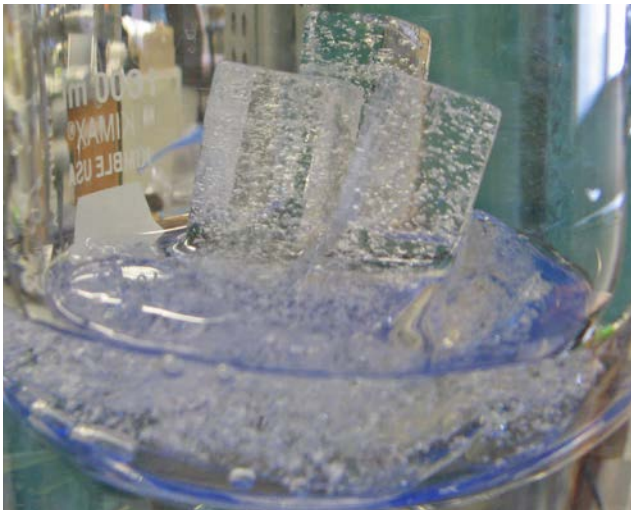
L'Antarctique se réchauffe, certes, mais nous ne connaissons presque rien du climat de cette région du globe. Peut-être est-ce normal, peut-être est-ce apparu par le passé, peut-être cela n'a-t-il pas de conséquences pour la stabilité de la calotte glaciaire. Il est utile de remonter dans le temps pour voir si ce type d'événement s'est déjà produit et, ainsi, mieux appréhender l'importance du réchauffement actuel. La température dans le trou de forage ne permet pas de répondre à cette question, du fait de la diffusion, qui lisse les variations climatiques anciennes, mais nous pouvons utiliser un autre indicateur : les bulles d'air piégées dans la glace et la composition isotopique des gaz qu'elles contiennent.

La surface de la calotte glaciaire est couverte de neige qui, sous son propre poids, devient progressivement plus dense, jusqu'à devenir de la glace solide à environ 70 mètres de profondeur. La neige ancienne, appelée névé, est poreuse, et l'air contenu dans les pores peut se déplacer par diffusion moléculaire, jusqu'au moment où les bulles se referment, à environ 66 mètres de profondeur, scellant pour toujours l'air dans la glace. Tant que la porosité est ouverte vers l'extérieur, l'air peut bouger par diffusion entre la surface et la profondeur de piégeage. Or chaque atome ou molécule a une vitesse de diffusion différente, qui dépend en grande partie de sa masse. C'est en particulier le cas des isotopes – des atomes d'un même élément, avec le même nombre de protons et d'électrons, mais un nombre différent de neutrons et donc une masse différente.

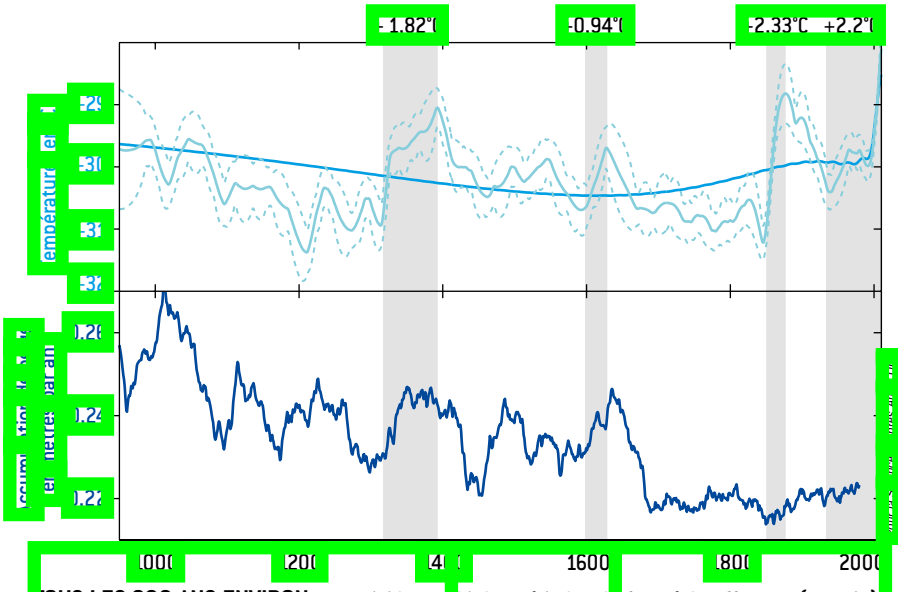
Ainsi, les molécules constituées d'isotopes différents diffusent dans le névé à des vitesses différentes, d'où un écart entre la composition de l'air de surface et celle de l'air piégé dans la glace. En particulier, quand la température augmente, le fond du névé, plus froid que la surface, concentre les isotopes lourds.

Ce mécanisme permet de reconstituer les changements de température en





LES COUCHES DE NEIGE se distinguent facilement dans un puits recouvert de planches de bois. Un autre puits a été creusé derrière en laissant entre eux un mur de neige de 50 centimètres, de sorte que la lumière ne pénètre qu'à travers ce mur *(à gauche)*. On décèle ainsi combien de neige tombe par an, en combien d'événements, si les chutes sont plus fréquentes en été qu'en hiver. La neige d'hiver, faite de petits grains, est plus dense que celle d'été et apparaît plus foncée. En faisant fondre la glace forée, on distingue les bulles d'air qui y sont piégées et qui, elles aussi, contiennent des informations précieuses sur le climat passé *(à droite)*.



TOUS LES 200 ANS ENVIRON, WAIS Divide a s… fort réchauffement *(en gris)*. C'est ce qu'a montré la reconstruction de la température sur le dernier millénaire à partir de l'analyse des gaz piégés dans la glace *(en haut)*. Toutefois, la reconstruction du taux d'accumulation de neige à WAIS Divide à partir de l'épaisseur des couches annuelles montre que, contrairement aux réchauffements antérieurs, le dernier n'est pas associé à un changement de la quantité des précipitations, ce qui suggère qu'il est d'une nature différente *(en bas)*.

étudiant la composition isotopique des gaz inertes tels que l'argon et le krypton dans la glace. On utilise ces gaz inertes car leur composition isotopique ne change pas (de manière mesurable) avec le temps dans l'atmosphère. Leur composition dans l'atmosphère étant constante, tout changement observé dans la glace par rapport à l'atmosphère est imputable à leur seule diffusion dans le névé.

En pratique, il s'agit de faire fondre des échantillons de glace sous vide, puis de récupérer l'air libéré par les bulles et d'analyser la composition isotopique de l'azote et de l'argon qu'il contient. Cette analyse indique quels ont été les changements de température à la surface de la calotte au cours de l'histoire, selon la profondeur des bulles analysées dans la carotte de glace.

Cette méthode avait déjà été utilisée auparavant, mais pour repérer un signal de bien plus grande amplitude, lors des changements climatiques abrupts de la dernière ère glaciaire. Pour déceler les changements du climat récent, il faut améliorer la précision des mesures. Avant de toucher aux précieux échantillons de glace, il m'a donc fallu perfectionner la méthode en faisant des essais sur de l'air extérieur. Chaque étape, chaque outil a été méticuleusement testé pour trouver les points d'amélioration possible. Cette étape de ma thèse a testé ma persévérance !

BIBLIOGRAPHIE

- A. Orsi, **Le climat du dernier millénaire en Antarctique**, dans *Cinq jeunes chercheurs d'avenir*, collectif, préface de Valérie Masson-Delmotte et Cédric Villani, Le Pommier, 2015.
- G. Ramstein, **Voyage à travers les climats de la Terre**, Odile Jacob, 2015.
- J. Jacquet et Cl. Laurius, **La Glace et le ciel**, Paulsen, 2015.
- J. F. Berger *et al.*, **Des climats et des hommes**, La Découverte, 2012.
- J. Jouzel *et al.*, **Planète blanche, les glaces, le climat et l'environnement**, Odile Jacob, 2008.
- E. Le Roy Ladurie, **Histoire du climat depuis l'an mil**, Flammarion, 1967 et 2009.

Au départ, je progresse vite, puis un problème étrange apparaît : la mesure du premier échantillon du matin donne un résultat anormal. J'effectue une centaine de tests, sans parvenir à trouver la solution. De longs mois passent, sans progrès, avant que je trouve enfin la réponse : il faut laisser reposer les échantillons une nuit avant d'effectuer les mesures, qui ne donnent alors plus de résultats aberrants. Il faut savoir être patient !

La course contre la montre commence : je dois mesurer 300 échantillons de glace à raison de quatre par jour, faire l'analyse des données et rédiger ma thèse avant que mon visa n'arrive à expiration : je dispose de neuf mois, en tout et pour tout. Ross, notre technicien, vient me prêter main-forte. Il s'occupe des mesures les quatre premiers jours de la semaine pour que je puisse rédiger ma thèse, et je prends le relais les trois autres jours. À nous deux, nous terminons juste avant Noël. Il me reste trois mois pour faire l'analyse des données et écrire le dernier chapitre.

Un réchauffement de nature différente

Tout est prêt. Les trois pièces du puzzle s'emboîtent : la température de trou de forage, les mesures de gaz et le modèle qui permet de faire le lien entre les deux, écrit et testé sur un autre jeu de données en attendant que les nôtres soient disponibles. Je peux enfin produire une série temporelle complète *(voir la figure ci-dessus)*. Là, une surprise m'attend : des périodes de fort réchauffement, dont la vitesse est similaire à celle du réchauffement actuel, se retrouvent environ tous les 200 ans. En comparant la température avec d'autres indicateurs du climat, telles l'épaisseur des couches annuelles de neige, qui nous renseigne sur le taux des précipitations, ou la concentration des poussières, qui nous renseigne sur la force du vent (plus le vent est fort, plus la concentration de poussières dans l'air augmente), je me rends compte que, contrairement à ces événements antérieurs similaires, le réchauffement récent n'est pas associé à des changements concernant les précipitations. Cette observation suggère que le réchauffement actuel est d'une nature différente de celle des réchauffements du passé et qu'il est probablement lié à des changements climatiques globaux plutôt qu'à des variations régionales du climat.

Ces résultats fournissent des informations sur la réaction du système climatique au forçage externe. Ils donnent aussi des pistes pour tester et améliorer les modèles qui nous permettront de mieux prédire le climat futur. Par exemple, on a montré qu'il y a eu une période froide en Antarctique durant le petit âge glaciaire. Les modèles la simulent-ils ? Le font-ils avec la bonne amplitude, ou au moins avec une amplitude comparable à celle de l'hémisphère Nord ? Sinon, quels sont les mécanismes manquants ?

D'autres projets

Mars 2013, nouveau coup de fil : « Anaïs, j'ai fait du gruyère dans Dronning Maud Land, il y a cinq trous à mesurer. Est-ce que tu veux m'accompagner ? Ce sera une toute petite expédition. » L'aventure continue !

Aujourd'hui, je poursuis mes travaux sur la température en Antarctique non seulement sur d'autres sites de forage, mais aussi en utilisant de nouveaux outils. À l'issue de ma thèse, j'ai reçu une bourse de l'Union européenne pour poursuivre ce type de travaux dans une autre région de l'Antarctique, à Talos Dome, une carotte forée par les Français et les Italiens. Les résultats sont encore préliminaires, mais ils vont dans le même sens.

Et à Dronning Maud Land, sur la zone « atlantique » de l'Antarctique, j'ai aussi un projet de mesurer le réchauffement climatique. Les réanalyses (des interpolations entre un modèle et les données existantes) prédisent un très faible réchauffement, mais le peu de données existantes, issues des températures de trou de forage, indiquent un réchauffement significatif. Qui a raison ?

Malgré les difficultés, je suis toujours autant passionnée par mon sujet d'étude. Chaque réponse trouvée apporte son lot de nouvelles questions : ces changements tous les 200 ans sont-ils visibles dans d'autres régions, en Patagonie par exemple ? Qu'est-ce qui peut causer une telle périodicité ? Les modèles climatiques sont-ils capables de reproduire ces événements ? C'est une des questions clés qu'il nous faudra résoudre pour mieux comprendre le réchauffement climatique en cours. ■

SUR LE WEB

Le site du campement de WAIS Divide :
http://www.waisdivide.unh.edu

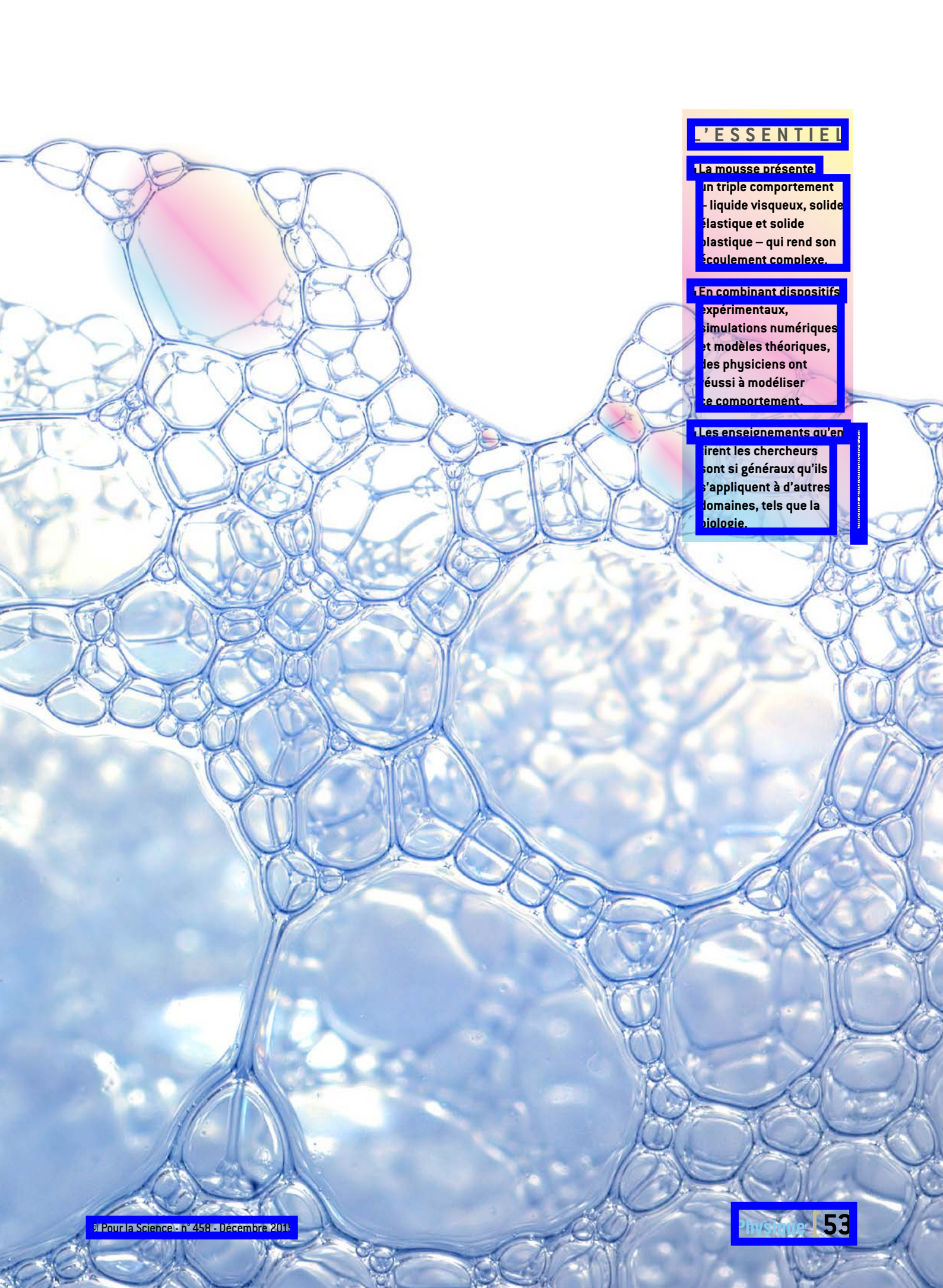
GIEC, Changements climatiques 2013 : les éléments scientifiques. Résumé à l'intention des décideurs, Contribution du groupe de travail I :
http://bit.ly/1k5sGpi



La solidité de la mousse liquide

Ibrahim Cheddadi, Pierre Saramito et François Graner

À la fois liquides et solides, les mousses s'écoulent de façon bien mystérieuse pour les physiciens. Récemment, la compréhension de leur comportement a ouvert des horizons dans divers autres domaines.



L'ESSENTIEL

- La mousse présente un triple comportement – liquide visqueux, solide élastique et solide plastique – qui rend son écoulement complexe.
- En combinant dispositifs expérimentaux, simulations numériques et modèles théoriques, les physiciens ont réussi à modéliser ce comportement.
- Les enseignements qu'en tirent les chercheurs sont si généraux qu'ils s'appliquent à d'autres domaines, tels que la biologie.

LES AUTEURS



Ibrahim CHEDDADI est postdoctorant à l'Inra, à Avignon et à l'Inria, à Montpellier.



Pierre SARAMITO est directeur de recherche CNRS au laboratoire Jean Kuntzmann de l'université Joseph Fourier, à Grenoble.



François GRANER est directeur de recherche CNRS au Laboratoire matière et systèmes complexes de l'université Paris-Diderot.

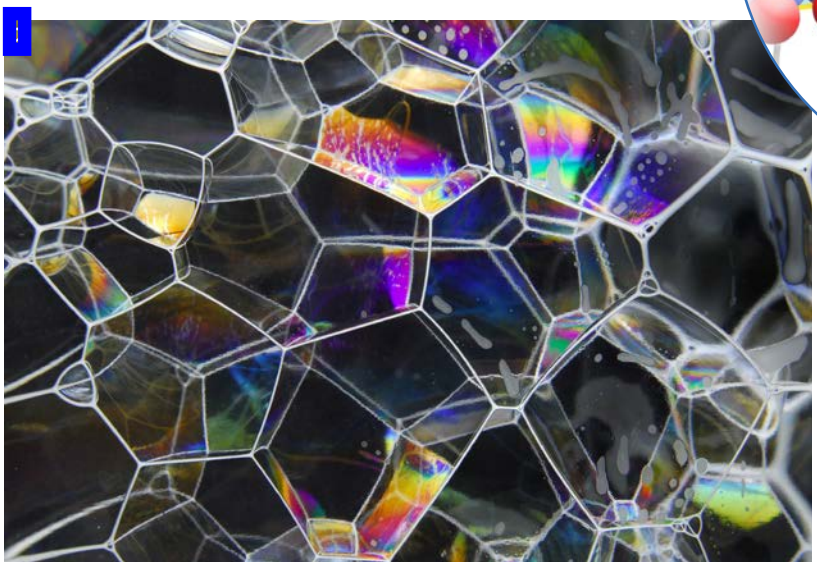
Mettez un peu d'eau dans une bouteille, ajoutez quelques gouttes de liquide vaisselle, agitez... la mousse se forme. Avez-vous déjà essayé de la rincer ? Connaissez-vous rien de plus agaçant ? Cette écume, si fragile, constituée de bulles d'air entourées de liquide, résiste obstinément à toute tentative de la faire s'écouler à travers le goulot, comme s'il s'agissait d'un solide. Pourquoi cet assemblage de gaz et de liquide se comporte-t-il ainsi ? Pour le comprendre, il faut s'intéresser à la dynamique des mousses, un domaine dont l'exploration est possible depuis quelques années grâce à de nombreux progrès expérimentaux et théoriques, ainsi que par l'amélioration des simulations numériques.

Pourtant, les mousses sont partout dans notre quotidien : bière fraîche, bain moussant, garniture des matelas (où un solide remplace le liquide autour des bulles d'air). Une autre application bien connue est la mousse des extincteurs : contrairement à l'eau, la mousse est plus légère que l'huile, ce qui la rend efficace sur un feu de pétrole. Les mousses inspirent même les artistes : d'un tableau de Jean Siméon Chardin, *La bulle de savon*, à un opéra contemporain dansé sur une scène remplie de mousse, en passant par les bulles géantes d'un clown. La coopération entre art et science a trouvé de quoi se nourrir au milieu de couleurs irisées.

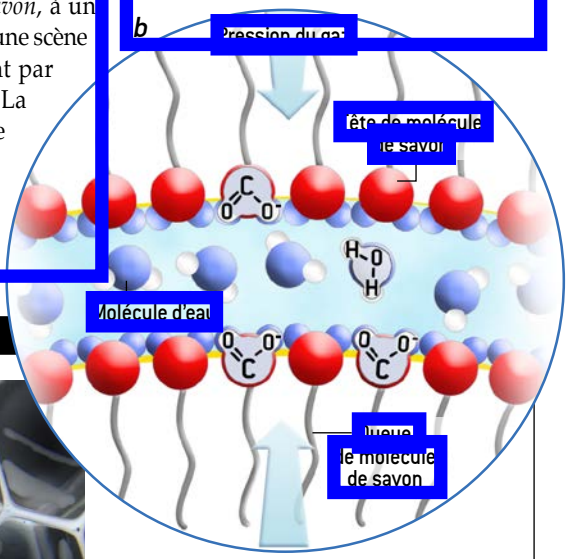
L'omniprésence des mousses a depuis longtemps attiré l'attention des savants. L'enjeu était alors de décrire la géométrie des bulles d'une mousse statique et les conditions de cette stabilité. Ainsi, en 1873, le physicien belge Joseph Plateau a énoncé les règles qui régissent l'assemblage des bulles et l'équilibre mécanique de la mousse : l'angle entre deux faces d'une bulle est de 120 degrés, chaque sommet est commun à 4 arêtes et l'angle entre les arêtes est proche de 109,5 degrés. Les chercheurs se sont également intéressés à l'agencement optimal de bulles toutes de même volume et respectant les règles de Plateau. En 1887, Lord Kelvin a avancé l'hypothèse que la meilleure solution est un pavage périodique avec un polyèdre à 14 faces. Il faut attendre 1993 pour que Denis Weaire et Robert Phelan, du Trinity College, à Dublin, trouvent une solution un peu meilleure en combinant deux motifs de même volume.

Facile à observer et peu coûteuse, la mousse de savon s'est imposée comme système modèle en laboratoire pour des scientifiques de diverses disciplines. Les mathématiciens, bien que rarement enclins à s'appuyer sur des expériences, ont reconnu

LA STRUCTURE DES MOUSSES



b



La mousse liquide est constituée de bulles d'air *(a)* dont les parois *(b)* sont composées de films d'eau savonneuse. Les molécules du savon se placent à l'interface entre l'eau et l'air avec une tête qui se dissout dans l'eau et une queue grasse qui a fuit. Les charges portées par les têtes se repoussent et empêchent le film de s'amincir et de casser. L'équilibre global de la structure tient aussi compte d'autres forces : gravité du liquide, pression du gaz, tension et élasticité des interfaces.

dans les films de savon des objets tendus, qui spontanément diminuent leur surface jusqu'à ce qu'elle soit minimale. Entre autres, Richard Courant, Américain d'origine allemande, qui a étudié les « surfaces minimales » dans les années 1950, a beaucoup observé les films de savon.

La mousse reste, en soi, un objet complexe. Le comportement macroscopique de la mousse dépend, à l'échelle millimétrique, des bulles qui la constituent, à l'échelle micrométrique, des films d'eau savonneuse qui forment les parois de ces bulles et, à l'échelle nanométrique, des molécules qui stabilisent ces films *(voir l'encadré page ci-contre)*. Comprendre la mousse nécessiterait ainsi d'intégrer dans sa description des phénomènes qui agissent à des dimensions s'étalant sur neuf ordres de grandeur.

Cette compréhension est relativement bien établie pour une mousse immobile, à l'équilibre statique. L'étude du lien entre les molécules et le film a bénéficié des progrès de la physico-chimie, en particulier de l'école bulgare durant ces dernières décennies, aboutissant à des formulations stables, reproductibles et modulables à la demande. Durant les années 1980 à 2000, l'école française s'est beaucoup impliquée dans l'analyse du lien entre le film et la bulle, un ensemble dominé par les phénomènes de capillarité. Parallèlement, le lien entre la bulle et la mousse a été approfondi – des avancées où se sont illustrés des physiciens irlandais en collaboration avec des mathématiciens géomètres ou topologues de différents horizons.

La mousse qui s'écoule, un problème complexe

En revanche, les propriétés des mousses en écoulement sont moins bien maîtrisées. Or ces situations sont celles qui intéressent le plus les industriels. Les exploitations minières consomment près de 90 % des agents moussants produits dans le monde par an pour séparer les minerais utiles de la gangue inutile. L'industrie pétrolière aussi en utilise en grandes quantités, tant pour le forage que pour l'extraction. Des dizaines d'autres créneaux plus exotiques vont de l'amortissement des chocs à la fracturation des roches en passant par l'injection de médicaments dans les veines. Ces applications font appel aux propriétés complexes d'écoulement de la mousse, sur lesquelles se penchent les chercheurs.

Notre équipe s'est particulièrement intéressée à la dynamique des mousses et ses applications à la biologie. Les observations des tissus biologiques – les premières remontent à Antoni van Leeuwenhoek au XVII^{e} siècle – ont mis en évidence une analogie, au moins de forme, avec une mousse faite de bulles. Si les bulles et les cellules ont des propriétés très différentes, leur façon de s'assembler présente de réels points communs. Cela nous a conduits à étudier l'écoulement des mousses pour comprendre la dynamique des cellules biologiques au sein des tissus *(voir l'encadré page 58)*.

Dans ce type d'études interdisciplinaires, nous collaborons avec des collègues qui s'intéressent à différents fluides dits complexes, faits par exemple d'émulsions ou de polymères. L'intérêt de la mousse est que c'est « le plus simple des fluides complexes », autrement dit le plus facile à étudier.

Depuis les années 2000, l'effort de recherche a surtout concerné les propriétés mécaniques d'une mousse. Intuitivement, on sent que la consistance de la mousse, qui contribue grandement à son charme, sort des catégories qu'on enseigne à l'école. Est-elle solide ? Est-elle liquide ? Peut-elle être liquide et solide à la fois ? Qu'est-ce que cela signifie ?

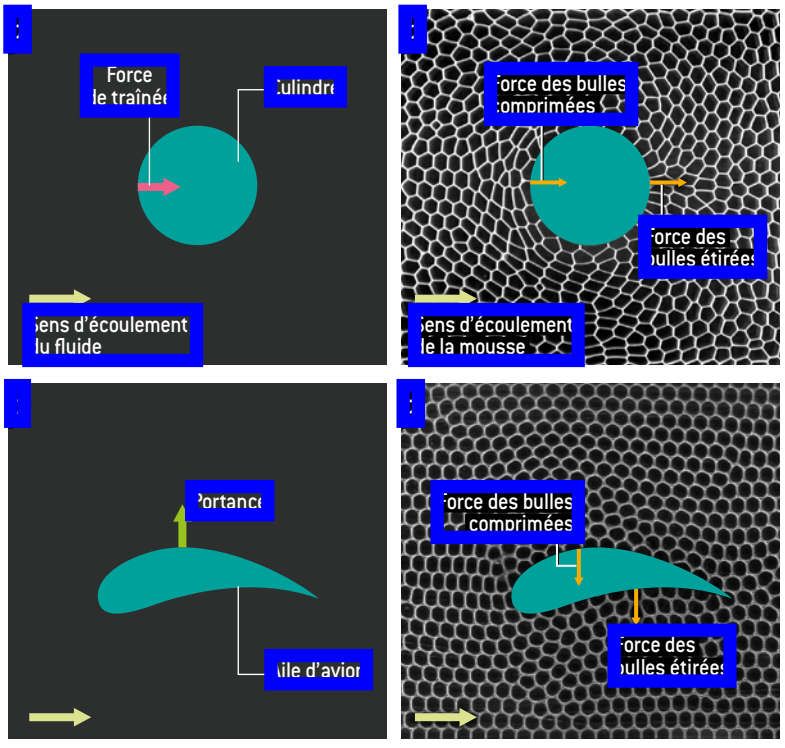
Déposez dans votre main un peu de mousse à raser. Titillez-la délicatement avec un doigt : la mousse se déforme, ce qui signifie que les bulles qui la composent se déforment aussi, même si vous ne le constatez pas à l'œil nu. Quand vous retirez votre doigt, la mousse reprend sa forme initiale : les bulles reviennent dans la configuration non déformée, où leur énergie est plus petite. Votre morceau de mousse à raser a ainsi une forme propre et un comportement réversible. À strictement parler, c'est alors un solide élastique, tel un morceau de caoutchouc. Cette propriété est d'autant plus surprenante que, rappelons-le, cette mousse est faite d'un mélange de deux fluides ! En l'occurrence un gaz, celui des bulles, dispersé dans un liquide, celui des parois.

Soyez maintenant moins délicat et appuyez franchement sur la mousse à raser avec votre doigt. Celui-ci s'enfonce, sculpte la mousse. La mousse est modelable ou « plastique », comme peut l'être une boule de pâte à modeler, qui a une forme acquise. Autrement dit, en passant d'une petite déformation à une grande, vous avez modifié le comportement de la mousse, qui, d'un solide élastique, s'est muée en un solide plastique. On le comprend en observant les réarrangements de bulles. Quand on appuie légèrement, les bulles se déforment, mais restent à leur place ; et quand on arrête d'appuyer, les bulles reprennent leur forme. En revanche, si on appuie fortement, les bulles changent de voisines, certaines s'éloignent tandis que d'autres se rapprochent et une nouvelle configuration se met en place de façon irréversible.

Que se passe-t-il si vous déformez la mousse plus vite, c'est-à-dire si vous bougez rapidement une partie de la mousse par rapport à ses voisines ? Vous pouvez faire le test avec une lame de rasoir : la finesse de la lame crée des disparités brutales de vitesse sur de petites distances. Les comportements de type solide disparaissent. Vous constatez un comportement qu'on attend normalement d'un fluide : un écoulement visqueux, tel celui de l'huile.

La mousse a un comportement élastique, plastique ou visqueux selon la perturbation que vous lui appliquez.

UNE MOUSSE QUI S'ÉCOULE NE SE COMPORTE PAS COMME UN FLUIDE



Les chercheurs ont comparé le comportement d'un fluide (air ou eau) et d'une mousse lors d'un écoulement face à un obstacle. Si l'obstacle est un cylindre (le pilier d'un pont ou un gratte-ciel), le fluide exerce sur lui une force de traînée *(a)*. Avec une mousse, d'autres forces apparaissent. En amont, les bulles élastiques sont comprimées et, par réaction, appuient plus sur l'obstacle *(b)*. À l'inverse, en aval de l'obstacle, les bulles sont étirées et tirent sur l'obstacle.

Si l'obstacle a une forme d'aile d'avion, un fluide crée une force, la portance, qui permet aux avions de voler. Le fluide s'écoule plus vite au-dessus de l'aile qu'en dessous, ce qui diminue la pression sur la partie bombée et crée un effet d'aspiration vers le haut *(c)*. Avec de la mousse, un effet contraire émerge. Les bulles au-dessus de l'aile sont écrasées sur l'aile et poussent vers le bas ; celles en dessous sont étirées et entraînent aussi l'aile vers le bas *(d)*.

La mousse et l'acier, des points communs utiles

Dans les années 1950, le Britannique Cyril Smith, spécialiste de la métallurgie, a mis en évidence une analogie entre les vieillissements de la mousse de savon et de l'acier. Les propriétés d'un acier dépendent beaucoup de sa structure en petits grains cristallins, une structure qui, elle celle de la mousse, évolue au cours du temps en vieillissant. Smith étudia ces structures à partir de la mousse de savon, plus facile à observer à l'œil nu qu'un acier au microscope.

Ainsi, la même mousse peut être élastique, plastique ou visqueuse, selon la perturbation appliquée. Certes, d'une mousse à l'autre, les propriétés particulières changent. Telle mousse est plus rigide, telle autre tolère des déformations plus grandes, telle mousse enfin casse si on essaie de la déformer trop vite. Ces différences proviennent de la proportion d'eau, de la composition du savon ou de la distribution des tailles des bulles, par exemple. Mais fondamentalement, le triple comportement élastique, plastique et visqueux est lié à la structure même de la mousse, plus précisément à sa nature cellulaire. Il y a ainsi une certaine universalité.

Une soufflerie à mousse

Comment étudier un tel triple comportement, aussi complexe qu'insaisissable ? Il faut d'abord le caractériser et le décrire, mais une difficulté est à surmonter : les bulles d'une mousse usuelle à trois dimensions diffusent la lumière, ce qui la rend opaque comme un brouillard. Une solution, que nous explorons, consiste à utiliser les rayons X, qui la traversent sans être déviés et en visualisent l'intérieur. Cela nécessite des équipements importants. Une autre solution a été proposée en 2001 par Georges Debrégeas, Hervé Tabuteau et Jean-Marc di Meglio, de l'institut Charles Sadron à Strasbourg. Ils se sont inspirés d'un dispositif utilisé pour les études statiques : la mousse est prise entre deux plaques de verre parallèles. Cette « mousse à deux dimensions », faite d'une seule couche de bulles, est facile à observer tant à l'œil nu qu'avec une caméra. Pour introduire un aspect dynamique, ils ont confiné la mousse entre deux cylindres concentriques d'axe perpendiculaire à la couche de mousse. Le cylindre interne tourne, entraînant ainsi la mousse, tandis que l'autre est fixe (un dispositif utilisé pour étudier l'écoulement de Taylor-Couette en mécanique des fluides). Les chercheurs visualisaient simultanément les changements de chaque bulle proche du cylindre qui tourne et l'écoulement d'ensemble à l'échelle de la mousse. Ils ont observé, par exemple, des mouvements de cisaillement au sein de la mousse. Mais le fait d'utiliser une seule configuration géométrique ne permet pas de recenser toutes les caractéristiques de la dynamique des mousses. Il est nécessaire de multiplier les géométries des dispositifs.

À partir de 2005, Benjamin Dollet et Christophe Raufaste ont étudié un dispositif différent durant leurs thèses réalisées à Grenoble sous la direction de l'un d'entre nous (François Graner). Avec des collègues de Grenoble, de Paris, de Dublin (en Irlande) et de South Bend (aux États-Unis), ils ont réalisé des expériences dans un canal rectangulaire d'un mètre sur quinze centimètres, également enfermé entre deux plaques de verre parallèles. Cette « soufflerie à mousse » est analogue à une soufflerie classique où l'on place une maquette de bateau ou d'avion dans un écoulement d'air ou d'eau. Ici, du gaz est soufflé avec un débit contrôlé dans de l'eau savonneuse. La mousse est ainsi produite à l'entrée du canal. Elle y entre et s'y écoule spontanément, puis sort à l'air libre.

La géométrie rectangulaire permet de tester de nombreuses configurations d'écoulement en introduisant des obstacles. La caméra visualise simultanément les divers réarrangements, déformations et vitesses des bulles. L'idée est d'accumuler de nombreuses informations sur le comportement des mousses afin de les modéliser.

Deux expériences consistent à faire passer la mousse soit à travers un petit trou, soit autour d'un obstacle circulaire. Ainsi, la mousse arrive par la gauche du dispositif avec des bulles peu déformées. En se rapprochant de l'obstacle ou du trou, elles s'étirent, se réarrangent et s'écoulent les unes par rapport aux autres. La mousse exerce sur l'obstacle une force dans la direction de l'écoulement, dite de « traînée », orientée vers l'aval comme on s'y attend *(voir l'encadré page ci-contre)*. Cette force est déterminée par le caractère visqueux de la mousse, comme dans un liquide usuel, mais aussi par ses propriétés élastiques, c'est-à-dire la propension des bulles à reprendre une forme régulière. Les bulles qui sont écrasées en amont de l'obstacle le poussent, celles qui sont étirées en aval le tirent. En outre, avant d'arriver à déplacer la mousse par rapport à l'obstacle, même à basse vitesse, il faut fournir une force suffisante pour forcer les bulles à se réarranger, signe de la plasticité de la mousse. Dès lors, la traînée d'une mousse se distingue de celle d'un liquide visqueux même à basse vitesse.

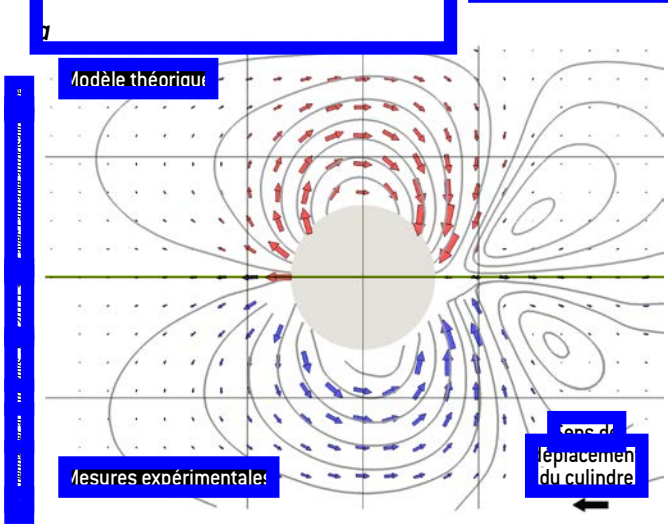
La mousse pousse l'aile d'avion vers le bas

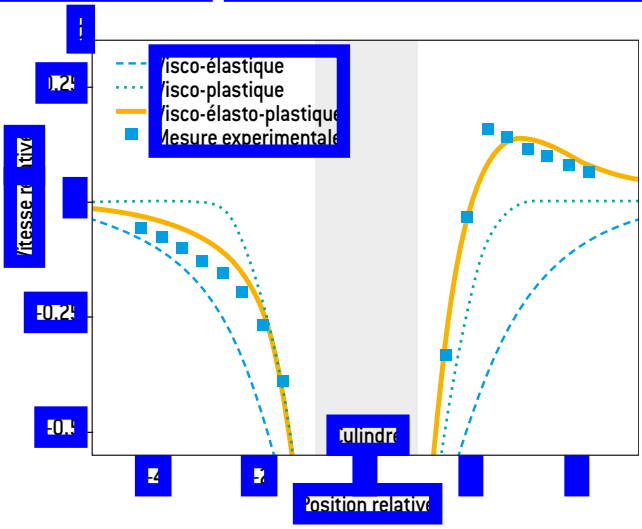
L'obstacle peut avoir d'autres formes, telle une ellipse ou un carré. Un cas intéressant est celui d'une aile d'avion. Dans une soufflerie classique, si de l'air s'écoule à haute vitesse autour d'un tel profil, l'air dispose de moins de place pour passer sur le dos que dans le creux de l'aile. Ainsi, l'air va plus vite sur le dos, ce qui y crée une dépression, et plus lentement sous l'aile, où se forme une surpression. La force qui en résulte, la portance, est perpendiculaire à l'écoulement, orientée du creux vers le dos, et dépend de la vitesse. C'est ainsi que le vent pousse une voile de bateau, ou qu'un avion plus lourd que l'air peut voler s'il avance vite. Dans la mousse, l'élasticité entraîne une réponse différente. Les bulles sur le dos de l'aile sont comprimées, les bulles dans le creux ont plus de place et sont étirées. Tendant à reprendre une forme régulière, les bulles du dos poussent l'aile, celles du creux la tirent. La contribution à la portance qui en résulte est indépendante de la vitesse et, surtout, orientée du dos vers le creux !

Grâce à ces observations, les physiciens ont commencé à se forger une intuition du comportement des mousses. L'étape suivante a consisté à développer des modèles pour affiner et tester la compréhension de l'expérience. L'intérêt immédiat est de permettre à un ingénieur de prévoir comment va s'écouler la mousse qu'il souhaite utiliser.

Des modélisateurs ont, par exemple, développé des théories statistiques ou des simulations numériques capables de représenter fidèlement la structure des bulles, au moins dans les écoulements lents, pour voir émerger leur comportement collectif. Comme dans les expériences, pour simplifier, les simulations se font plus souvent à deux qu'à trois dimensions.

Nous avons opté pour une autre approche en portant notre attention sur la mousse dans son ensemble, assimilée à un milieu continu. Nous avons dès lors considéré les équations les plus générales de la mécanique des milieux continus, en l'occurrence la conservation de la masse et celle de la quantité de mouvement. Puis nous avons injecté une troisième équation qui décrit le comportement spécifique de la mousse.





UN ECOULEMENT EST ETUDIE avec un cylindre qui se déplace dans la mousse de droite à gauche *(a)*. Les flèches indiquent la vitesse relative de déplacement de la mousse par rapport au cylindre. Les prévisions issues de la résolution des équations du modèle théorique *(en rouge)* sont en accord avec les mesures expérimentales *(en bleu)*. Ce modèle est fondé sur un écoulement visqueux, élastique et plastique. Le profil de vitesse de la mousse *(b)* au niveau de l'axe *(a, en vert)* compare les points expérimentaux *(points bleus)* à différents modèles. Seul le modèle visqueux, élastique et plastique reproduit l'effet d'entraînement de la mousse, avec une vitesse relative positive en aval.

DES MOUSSES POUR ETUDIER LES TISSUS BIOLOGIQUES

Les tissus biologiques sont des structures dynamiques au sein desquelles les cellules se réarrangent – surtout dans les épisodes tels que le développement de l'embryon,

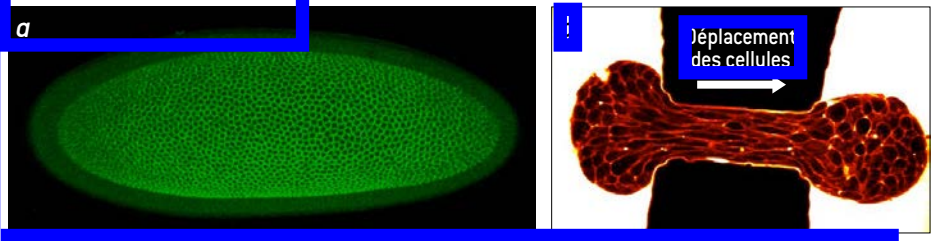
L'hydre d'eau douce en est un exemple extrême. Cet animal d'un centimètre de long est capable de se régénérer : si on le coupe en deux, cinq, voire dix morceaux, chaque partie reprend spontanément la forme de l'animal et on obtient finalement dix hydres normales. Encore plus fascinant : si on dissocie toutes ses cellules, qu'on les mélange et qu'on les réagrège, on obtient une petite boule... qui elle aussi reforme, en une semaine, une hydre adulte !

Plus généralement, l'auto-organisation des cellules est un élément clé de l'extrême diversité des formes observées dans les organismes naturels. Un tissu est la somme des cellules qui le constituent et de leurs interactions. Ces dernières sont de deux types : biochimiques (signalisation entre cellules voisines) et mécaniques (les forces auxquelles les cellules sont soumises).

D'un point de vue statique, l'analogie entre mousse et tissu cellulaire explique bien les formes d'équilibre des cellules au sein de certains tissus par une minimisation de l'énergie *(a)*. Dans la mousse, où les parois des films séparant les bulles ont toutes la même tension, l'énergie minimisée est simplement proportionnelle à la surface des films. Dans des tissus dits « épithéliaux », tels que l'aile, le dos ou la rétine de la mouche, l'énergie inclut la rigidité du squelette de chaque cellule et l'adhésion entre cellules voisines. Sur ce point précis de la forme des cellules, le système biologique apparaît comme un système physique dominé par la mécanique, où la biochimie intervient essentiellement pour fixer les paramètres, certes plus compliqués que dans une mousse.

En est-il de même en dynamique ? En quelle proportion interviennent la mécanique et la biochimie pour expliquer l'évolution de tissus ? Sham Tlili a étudié cette question au cours de sa thèse sous la direction de François Graner. Elle a réalisé des écoulements contrôlés de cellules autour d'un obstacle ou à travers un trou, à deux ou trois dimensions. Sur la figure *b*, un agrégat de cellules de souris, aspiré par un écoulement d'eau, s'écoule à travers un trou. En amont (à gauche) les cellules sont étirées vers le trou ; en aval, elles reprennent peu à peu une forme plus régulière.

Ce comportement ressemble à celui des mousses. Les travaux sur les mousses ont ainsi été cruciaux pour modéliser les écoulements de cellules et les comparer à des modèles de matériaux visco-élasto-plastiques. Les chercheurs ont néanmoins observé des différences. Les cellules présentent un mouvement saccadé qu'il reste à comprendre.



CES TISSUS BIOLOGIQUES ressemblent à des mousses, en déformation lente avec un embryon de mouche *(a)* ou en déformation rapide avec des cellules de souris aspirées à travers un trou *(b)*.

Les physiciens savent décrire de nombreux matériaux. Les solides élastiques simples sont régis par des équations établies depuis près de deux siècles, et il en est de même pour les liquides visqueux simples. Les ingénieurs, mécaniciens, physiciens, mathématiciens ont eu tout loisir d'étudier ces équations, de les résoudre, de les tester en les confrontant aux expériences. On connaît aussi des matériaux visco-élastiques, comme la poix ou ces amusantes pâtes de polymères commercialisées sous le nom de « silly putty », ainsi que des matériaux viscoplastiques, ou « fluides à seuil », tels que des peintures ou des laves volcaniques, qui s'écoulent dès qu'on applique une force supérieure à un certain seuil. Ces matériaux sont étudiés depuis près d'un siècle et l'on a un recul suffisant pour savoir mettre en équation leur comportement en écoulement, par exemple autour d'un obstacle ou au travers d'un trou.

Pour tirer parti de cette expertise accumulée et aborder les écoulements d'une mousse, nous avons commencé par simplifier le problème en oubliant... qu'il s'agissait d'une mousse. Nous nous sommes efforcés de modéliser un matériau visco-élasto-plastique le plus simple possible, décrit par une viscosité constante, une rigidité élastique constante, et un seuil de déformation au-delà duquel la plasticité apparaît.

Suivez les bulles !

Même ainsi, la résolution des équations est d'une redoutable complexité. Elle a fait l'objet de la thèse de l'un de nous trois (Ibrahim Cheddadi) sous la direction des deux autres. La difficulté provenait des équations qui ont des non-linéarités nombreuses et fortes. D'un point de vue physique, ces non-linéarités signifient que la réponse d'un système n'est pas proportionnelle à la force exercée, ce qui traduit le fait que les trois comportements rétroagissent les uns sur les autres.

À ce stade de nos travaux, nous avions d'un côté des expériences et de l'autre des équations avec des prédictions théoriques. Comment les comparer ? Par exemple, notre œil est plus attiré par les contours des bulles elles-mêmes que par l'écoulement à grande échelle. Nous avons donc développé des méthodes de mesure quantitative.

En 2008, avec Benjamin Dollet, Christophe Raufaste, Philippe Marmottant et d'autres physiciens grenoblois, nous avons eu l'idée d'utiliser les bulles pour caractériser la mousse à grande échelle tout comme de petites particules fluorescentes dans un fluide aident à en mesurer la vitesse. Nous suivions chaque bulle d'une image à la suivante pour mesurer son déplacement entre deux images successives. En poursuivant la même idée, nous avons aussi analysé la forme des bulles et leurs changements de voisines.

Nous avons ensuite créé des outils statistiques pour exploiter au mieux ces données. Partant de milliers d'images

contenant chacune des milliers de bulles analysées localement, c'est-à-dire de millions d'informations locales, nous avons obtenu un petit nombre de mesures moyennes très précises de grandeurs physiques globales intervenant dans la théorie de la mécanique des milieux continus : la vitesse, la déformation et la réponse plastique de la mousse.

D'une portée générale, ces outils statistiques se sont révélés utiles pour décrire bien d'autres systèmes faits de petits objets qui se réarrangent : verres, suspensions colloïdales, émulsions, tissus biologiques.

Un modèle en accord avec les expériences

Les prévisions théoriques et les mesures se sont étonnamment bien accordées, jusque dans les détails *(voir la figure page 57)*. Cet accord est meilleur que nous ne l'espérions, compte tenu du fait que le modèle choisi était le plus simple possible. En outre, nous avons mis en évidence des comportements spécifiques de la combinaison triple entre viscosité, élasticité et plasticité. Par exemple, quand l'obstacle se déplace dans la mousse, même à basse vitesse, l'écoulement de la mousse autour de lui montre une nette asymétrie entre l'amont et l'aval. Derrière l'obstacle, la vitesse de l'écoulement passe par un point d'arrêt, change de signe, augmente, passe par un maximum et décroît.

Par ailleurs, lorsque nous avons analysé l'expérience de Georges Debrégeas et de ses collègues sur la mousse entraînée entre deux cylindres, nous avons constaté que l'écoulement dépend de l'état initial de la mousse, en particulier des contraintes mécaniques qui apparaissent au début de l'expérience lorsqu'on remplit de bulles le dispositif. Quand le cylindre intérieur est mis en rotation, la mémoire de ces contraintes initiales disparaît peu à peu, mais jamais totalement. Même quand un écoulement permanent et stable finit par être atteint, il dépend encore un peu de l'état initial de la mousse. Autrement dit, il n'est pas unique, et deux expériences successives peuvent donner des vitesses différentes. Cela justifie *a posteriori* le choix pour nos expériences d'une autre géométrie, en l'occurrence des écoulements dont l'hétérogénéité est forcée, qui eux sont reproductibles.

Ces comportements n'existent pas dans les écoulements visqueux simples, visco-élastiques ou visco-plastiques. L'aspect visco-élasto-plastique joue un rôle essentiel dans la dynamique de la mousse et il n'est pas possible de l'étudier en décomposant le système en sous-éléments plus simples pour isoler les aspects visqueux, plastique et élastique.

La confrontation d'expériences modèles à deux dimensions, d'expériences plus réalistes à trois dimensions, de simulations numériques et de modélisations théoriques montre l'émergence à grande échelle de propriétés de la mousse qui ne se ramènent pas trivialement à celles des bulles individuelles. En l'occurrence, au-dessus de deux ou trois diamètres de bulles, la mousse se comporte comme un milieu continu. Cependant, les expériences montrent que la mousse se distingue d'un fluide. Son comportement est plus riche et complexe. Bien que les bulles soient constituées de deux fluides, la mousse est solide.

Ce triple comportement est similaire pour des mousses de composition ou de taille de bulles très différentes. Cette universalité fait de la mousse un bon système modèle pour comprendre les matériaux complexes constitués d'un assemblage de cellules et, plus généralement, tous ceux qui sont à la fois visqueux, élastiques et plastiques (tels certains fluides d'émulsions ou de polymères). Les non-linéarités qui découlent de ce triple comportement créent une physique d'écoulement complexe et non intuitive, que l'on sait désormais bien prédire à partir d'un petit nombre de paramètres, tels que la viscosité, la rigidité élastique et le seuil plastique.

La physique des mousses dynamiques n'en est qu'à ses débuts. L'origine de ses paramètres, probablement cachée dans les interactions moléculaires, reste à expliciter. En outre, malgré l'universalité du comportement des mousses étudiées, certains effets peuvent varier du fait d'une composition différente, par exemple. Comment expliquer ces variations ? Il faudrait aussi prendre en compte des phénomènes dynamiques spécifiques tels que la rupture des films, le mûrissement par transfert de gaz d'une bulle à l'autre ou le drainage de l'eau vers le bas de la mousse sous l'effet de la gravité.

Quoi qu'il en soit, on comprend mieux maintenant pourquoi la mousse reste coincée dans la bouteille… parce qu'elle est solide !

BIBLIOGRAPHIE

- I. Cheddadi *et al.*, **Steady Couette flows of elastoviscoplastic fluids are non-unique**, *J. Rheol.*, vol. 56, pp. 213-239, 2012.
- I. Cheddadi *et al.*, **Understanding and predicting viscous, elastic, plastic flows**, *Eur. Phys. J. E*, vol. 34, pp. 1-15, 2011.
- I. Cantat *et al.*, **Les mousses, structure et dynamique**, Belin, 2010.
- N. D. Denkov *et al.*, **The role of surfactant type and bubble surface mobility in foam rheology**, *Soft Matter*, vol. 5, pp. 3389-3408, 2009.
- M. Vignes-Adler et F. Graner, **La vie éphémère des mousses**, *Pour la Science*, n° 293, mars 2002.
- D. Weaire et S. Hutzler, **The physics of foams**, Oxford University Press, 1999.



DES ELECTRODES EN OR ornent une cellule photovoltaïque à pérovskite rouge, fabriquée par l'Institut de technologie du Massachusetts. Cette cellule, moins épaisse que du papier, fait quelques millimètres.

Photovoltaïque
le silicium éclipsé ?

Varun Sivaram, Samuel Stranks et Henru Snaith

Des matériaux récemment entrés en lice, les pérovskites, pourraient enfin mener à des cellules photovoltaïques moins coûteuses et de meilleur rendement que les cellules au silicium d'aujourd'hui

L'ESSENTIEL

- Des cellules photovoltaïques produites à partir de pérovskites approchent les rendements des cellules au silicium.
- Fabriquée à plus basse température, la pérovskite pourrait devenir meilleur marché que le silicium.
- Il reste néanmoins de grands défis à relever : empêcher l'eau de pénétrer dans la pérovskite, garantir le confinement du plomb utilisé, passer à des tailles très supérieures.

À la nuit tombante, dans un bar japonais mal éclairé, l'étudiant en thèse Michael Lee griffonna sur un dessous de verre à bière une liste d'ingrédients chimiques encore fraîche dans sa mémoire. Plus tôt dans cette journée de 2011, des scientifiques de l'université Toin de Yokohama avaient généreusement fait part de leur recette pionnière pour fabriquer des cellules photovoltaïques à partir d'un matériau nouveau, une « pérovskite », en lieu et place de l'habituel silicium. Ces cellules convertissaient la lumière solaire en électricité avec un rendement énergétique de 3,8 % seulement, et personne n'y avait réellement prêté attention. Mais cela a inspiré Michael Lee.

Après être rentré au laboratoire Clarendon de l'université d'Oxford, où nous travaillions tous les trois à l'époque, il apporta toute une série de modifications à la recette. Il obtint ainsi la première cellule à pérovskite dont le rendement dépassait 10 %. Son invention déclencha l'équivalent, pour les énergies propres, d'une ruée vers le pétrole : des chercheurs du monde entier se sont mis dans la course pour augmenter encore le rendement des cellules à pérovskite.

Le dernier record en date, établi en novembre 2014 à 20,1 % par l'Institut coréen de recherche en technologie chimique, marque une multiplication par cinq du rendement en trois ans seulement. Par comparaison, après des décennies de développement, les meilleures cellules photovoltaïques au silicium plafonnent autour de 25 %, un objectif qui, pour nous autres chercheurs qui travaillons sur les pérovskites, n'est plus très éloigné. Nous anticipons également un lancement commercial, peut-être par l'intermédiaire d'une entreprise dérivée telle qu'Oxford Photovoltaics, cofondée par l'un d'entre nous (Henry Snaith).

Les pérovskites *(voir la figure page 62)* sont intéressantes pour plusieurs raisons. Les ingrédients en sont abondants, et les chercheurs peuvent les combiner facilement et à bon marché, à basse température,

pour produire des films. Ces derniers ont une structure cristalline proche de celle des couches de silicium obtenues grâce à un coûteux traitement à haute température. Une imprimante spécialement conçue pourrait un jour produire rapidement des rouleaux de films de pérovskite, minces et flexibles, à la place des épaisses et rigides plaques de silicium, dans l'objectif de réaliser des feuilles ou revêtements photovoltaïques légers, souples et même colorés.

Mais pour concurrencer le silicium, les cellules à pérovskite devront surmonter certains obstacles notables. Les prototypes actuels ne dépassent pas la taille d'un ongle, et les chercheurs doivent trouver le moyen de les agrandir considérablement. Ils doivent aussi améliorer fortement la sécurité et la stabilité à long terme de ces cellules.

Gagner la course au rendement

Les meilleures cellules au silicium ont aujourd'hui un rendement de 25,6 %. Pourquoi les cellules photovoltaïques ne peuvent-elles pas convertir 100 % de la lumière solaire ? Et en vertu de quoi les pérovskites seraient-elles capables de dépasser le record du silicium ?

Les réponses à ces questions se trouvent du côté de l'électron, cette particule qui est au fondement du courant électrique. Quand une cellule photovoltaïque est dans le noir, les électrons du matériau restent liés à leurs atomes respectifs. Aucune électricité ne circule. Mais quand de la lumière solaire frappe une cellule, elle peut libérer certains des électrons. Dotés d'énergie supplémentaire, ces électrons « excités » traversent chaotiquement le réseau cristallin de la cellule jusqu'à ce qu'ils en ressortent à une extrémité (happés par une électrode sous forme de courant utile), ou qu'ils rencontrent un obstacle ou un piège, où leur énergie se perd sous forme de chaleur.

Plus la qualité du cristal est élevée, moins il y a de défauts susceptibles de perturber le trajet de l'électron. Les cellules au silicium sont généralement chauffées jusqu'à 900 °C pour éliminer les défauts. Les pérovskites sont largement dépourvues de ces défauts, alors même qu'elles sont traitées à bien plus basse température, autour de 100 °C. Il en résulte que les électrons excités par la lumière réussissent aussi bien à sortir des cellules à pérovskite, et qu'ils risquent moins de perdre autant d'énergie en entrant en collision avec des obstacles. Comme la puissance électrique d'une cellule est le produit du flux d'électrons sortant de cette cellule (l'intensité du courant) et de l'énergie que transportent ces électrons (la tension), les pérovskites ont un rendement qui peut rivaliser avec celui du silicium, tout en étant plus facile à produire.

Mais il y a une limite à la quantité d'énergie solaire qu'une cellule photovoltaïque constituée de semi-conducteurs tels que le silicium ou les pérovskites peut convertir en puissance électrique. C'est essentiellement parce que les semi-conducteurs ont une bande d'énergies interdites aux électrons, ou gap, dont la hauteur (en énergie) correspond à l'énergie minimale nécessaire pour libérer les électrons *(voir la figure page ci-contre)*. Le rayonnement solaire inclut toutes les longueurs d'onde, mais seules certaines correspondent à des photons d'énergie supérieure au gap, qui peuvent donc être absorbés et exciter un électron. Les photons des autres longueurs d'onde traversent simplement le matériau sans aucun effet.

La bande interdite varie selon le semi-conducteur et définit un compromis fondamental : plus le gap est étroit, plus la cellule peut absorber de lumière solaire susceptible d'exciter les électrons, mais plus l'énergie de chaque électron sera basse. Comme la puissance électrique dépend à la fois du nombre et de l'énergie des électrons, même une cellule photovoltaïque ayant la bande interdite idéale ne pourra convertir que 33 % environ de l'énergie solaire.

Le silicium a une bande interdite fixe qui n'est pas idéale, mais il domine l'industrie de l'énergie solaire parce que les processus de fabrication associés à cette technologie sont bien compris et efficaces. Toutefois, avec des pérovskites, les chercheurs peuvent ajuster la bande interdite en jouant sur le mélange des ingrédients, ce qui donne l'espoir de dépasser les rendements atteints avec le silicium. Les chercheurs peuvent également superposer des pérovskites dotées de bandes interdites différentes. Les pérovskites à deux étages devraient permettre de crever le plafond des 33 % ; selon certaines projections, le rendement énergétique pourrait atteindre 46 %.

Les minéralogistes connaissent depuis le XIX^{e} siècle les formes naturelles de pérovskite présentes dans la croûte terrestre. De tels matériaux ont fait leur entrée dans le domaine de la supraconductivité à haute température en 1988. Ces deux dernières décennies, les ingénieurs ont également fait

LES AUTEURS



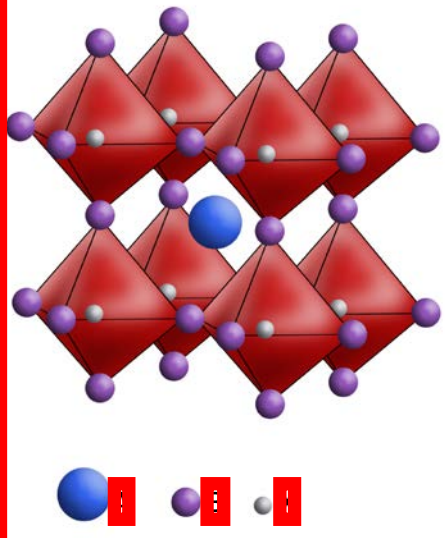
Varun SIVARAM est membre du cercle de réflexion américain Council on Foreign Relations et s'intéresse aux domaines de l'énergie, de la technologie et de la sécurité nationale.



Samuel STRANKS est chercheur au MIT (Institut de technologie du Massachusetts), où il étudie les applications optiques et électroniques des pérovskites.



Henry SNAITH est professeur de physique à l'université d'Oxford, en Grande-Bretagne, et directeur scientifique chez Oxford Photovoltaics, entreprise qu'il a cofondée.



LA STRUCTURE CRISTALLINE

d'une pérovskite cubique. Dans les pérovskites intéressantes pour les cellules photovoltaïques, le cation (ion positif) A est généralement l'ion méthylammonium $CH_3NH_3^+$, le cation B est du plomb (Pb^{2+}) et l'anion X est un ion halogénure (en général un iodure, I^-, mais parfois aussi un chlorure, Cl^-, ou un bromure, Br^-).

de l'électronique expérimentale avec des pérovskites artificielles, mais sans penser à l'utilisation potentielle de ce matériau dans des cellules photovoltaïques.

Enfin, en 2009, une équipe de l'université Toin a transformé une pérovskite à base d'halogénure de plomb, synthétisée pour la première fois en 1978, en cellule photovoltaïque. Les chercheurs ont mis en solution des substances chimiques triées sur le volet, puis ont fait tourner cette solution sur une lame de verre afin de l'étaler, avant de la sécher. Le séchage laisse une pellicule nanométrique de cristaux de pérovskite à la surface de la lame, un peu comme les cristaux de sel apparaissent par évaporation dans les marais salants. Ce film mince libérait des électrons quand il absorbait de la lumière du Soleil, mais pas très efficacement. Les chercheurs ont ajouté de minces couches de matériau de part et d'autre des nanocristaux de pérovskite pour améliorer le transfert des électrons à un circuit électrique externe.

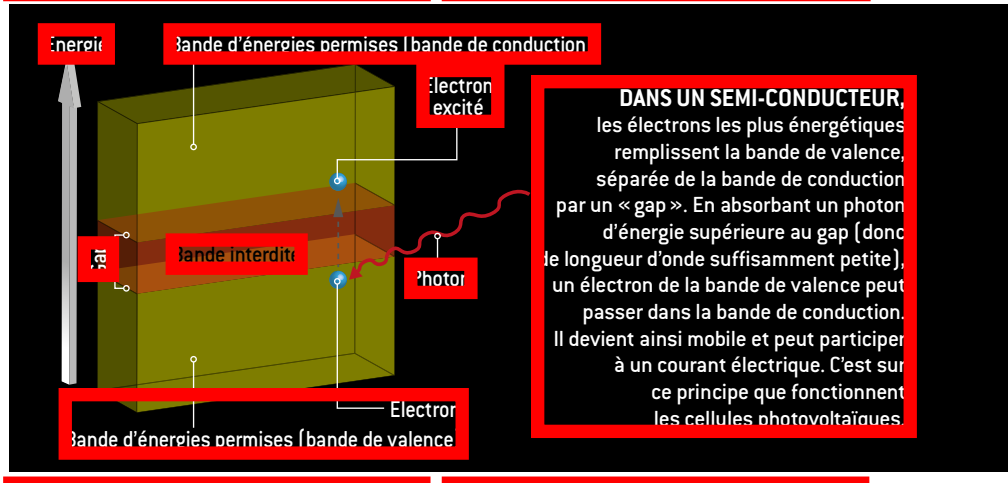
Les premières de ces cellules minuscules n'avaient qu'un rendement de 3,8 % et étaient très instables, se détériorant en quelques heures. Michael Lee modifia la composition de la pérovskite et remplaça une couche problématique de la cellule, ce qui a fait grimper le rendement au-dessus de 10 %. Une autre équipe de chercheurs, dirigée par Michael Grätzel, de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, et Nam-Gyu Park, de l'université Sungkyunkwan en Corée, a réalisé une avancée comparable.

La récente progression vers les 20 % a été rendue possible par quelques innovations astucieuses. La création d'une pellicule cristalline sans défauts fait appel à de délicates méthodes de dépôt. Une équipe dirigée par Sang Il Seok, de l'Institut coréen de recherche en technologie chimique, a ainsi conçu un processus en plusieurs étapes qui produit une pellicule de haute qualité cristalline. En optimisant le traitement, Sang Il Seok a battu successivement trois records de rendement en 2014, passant de 16,2 à 20,1 %.

D'autres scientifiques simplifient l'arrangement en couches des matériaux ajoutés ; les toutes dernières cellules à pérovskite ressemblent davantage à une cellule au silicium, simple superposition de couches planes. Dans le cas du silicium, cette conception a permis une production de masse à bas coût. Récemment, les chercheurs travaillant sur la pérovskite ont également chauffé la solution et la lame de verre sur laquelle elle est déposée, produisant ainsi des cristaux beaucoup plus gros que ceux des cellules initiales, signe encourageant indiquant que la cristallinité continue de s'améliorer.

Les scientifiques mettent également au point de nouvelles caractéristiques. En faisant varier les proportions des éléments chimiques, on peut créer des cellules avec une légère nuance jaune ou une touche de pourpre. En déposant la pérovskite sur le verre en îlots plutôt qu'en une seule couche mince, on parvient à créer des pellicules opaques ou transparentes, ou entre les deux (*voir la figure page 66*).

Toutes ces options (un éventail de choix bienvenu après les cellules au silicium rigides, opaques et invariablement bleu-noir) pourraient aider les architectes à concevoir des lucarnes, fenêtres et façades qui intègrent des films photovoltaïques à pérovskite. On peut par exemple imaginer un gratte-ciel aux fenêtres teintées aux pérovskites, qui protégeraient l'intérieur de la lumière brûlante du soleil en la convertissant en électricité, ce qui réduirait la facture de la climatisation.



Le long chemin vers la commercialisation

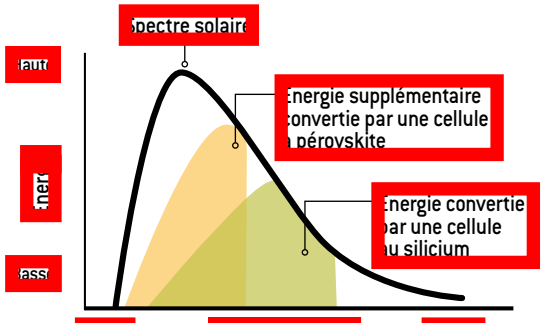
Il reste cependant beaucoup de chemin à faire avant que ces visions ne deviennent réalité. Bien que des chercheurs coréens et australiens aient récemment fait la démonstration de cellules imprimables de 10 centimètres par 10, suffisamment grandes pour des produits commerciaux compétitifs, les cellules aux meilleurs rendements ne sont encore que des prototypes de petites dimensions. Outre augmenter la taille des dispositifs, les laboratoires et les jeunes entreprises technologiques doivent garantir que les cellules sont suffisamment stables pour produire de l'électricité pendant plusieurs décennies, concevoir un produit que les consommateurs peuvent installer chez eux sans crainte et répondre aux critiques qui mettent en garde contre une surestimation des niveaux de rendement.

La stabilité des cellules photovoltaïques à pérovskite est sans doute leur talon d'Achille. Les pérovskites peuvent se dégrader rapidement parce qu'elles sont sensibles à l'humidité. Il faut donc les enchâsser de façon étanche. Les cellules que nous avons fabriquées en atmosphère inerte et encapsulées dans de l'époxy ont fonctionné de manière stable pendant plus de 1 000 heures sous une exposition continue à la lumière. Des chercheurs de l'université Huazhong de sciences et technologie, en Chine, en collaboration avec Michael Grätzel, ont également atteint cette durée même sans encapsulation ; et dans des travaux récemment publiés, ils ont déployé des panneaux tests en extérieur en Arabie Saoudite pour montrer que leur concept pouvait fonctionner dans des conditions réelles. Enfin, nous avons récemment rendu publics des résultats d'Oxford Photovoltaics qui montrent que les cellules à pérovskite peuvent produire un courant stable pendant plus de 2 000 heures en plein soleil.

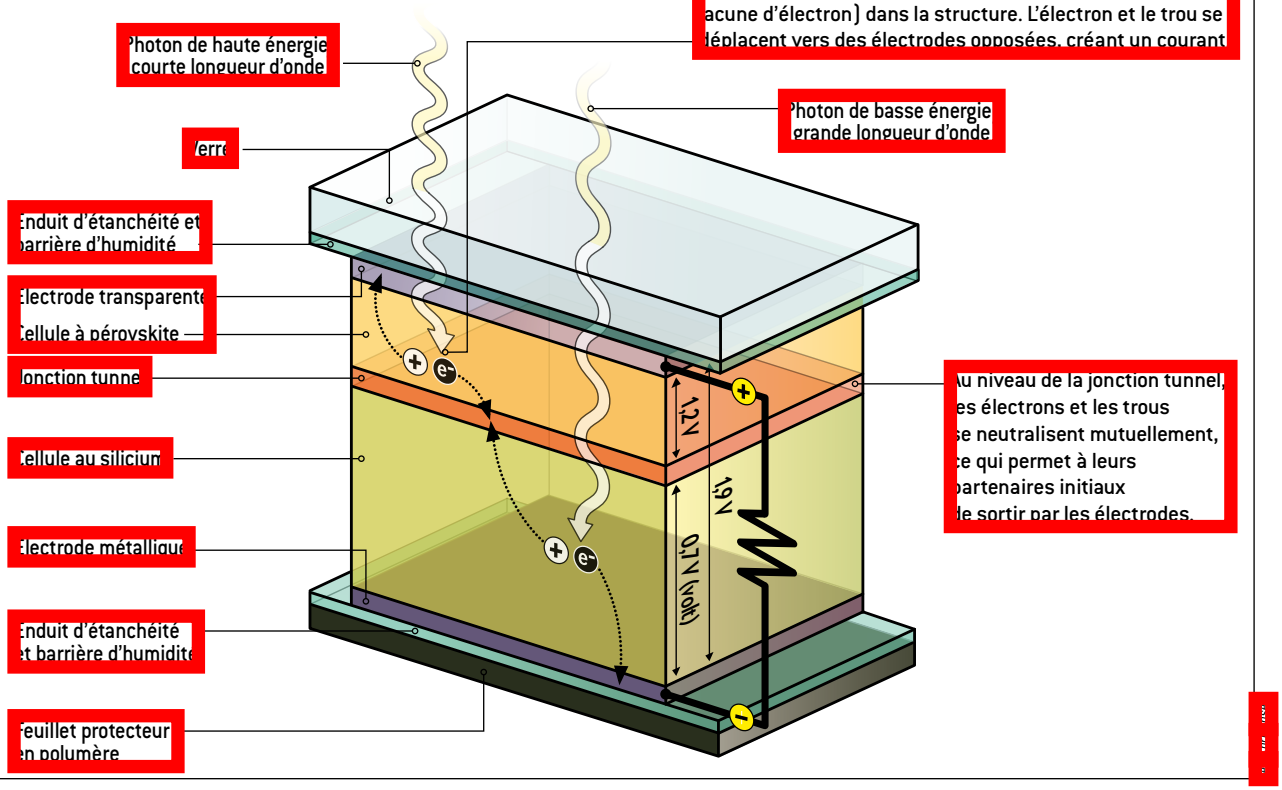
Mais la norme industrielle pour les panneaux solaires est une garantie de vingt-cinq ans. Cela équivaut à 54 000 heures sous un soleil intense et constant. Il est essentiel de trouver une protection efficace contre l'humidité, qui résiste sur une telle durée et sur une grande plage de températures. Les fabricants de panneaux au silicium ont résolu le problème en laminant les cellules entre des plaques de verre. C'est parfait pour de grandes installations au

DEUX PROCEDES VALENT MIEUX QU'UN

Plutôt que de se concurrencer commercialement, les cellules photovoltaïques au silicium et à pérovskite pourraient se compléter, convertissant la lumière du soleil en électricité avec un meilleur rendement que celui atteint par ces technologies séparément. Dans une cellule en tandem *(ci-dessous,)*, une couche de pérovskite et une couche de silicium sont connectées, générant des électrons avec une tension et une énergie plus élevées qu'on ne l'obtient avec l'un ou l'autre de ces matériaux utilisé seul.
La pérovskite et le silicium convertissent des longueurs d'onde différentes de la lumière solaire *(à droite)*, et leur association exploite donc une plus grande plage du spectre.



Un photon venu du Soleil communique de l'énergie à un électron. Ce dernier devient mobile, laissant un trou (ou une lacune d'électron) dans la structure. L'électron et le trou se déplacent vers des électrodes opposées, créant un courant



sol. Mais comme on peut fabriquer les cellules à pérovskite sous la forme de films beaucoup plus légers et flexibles que des cellules sur plaques de verre, des stratégies alternatives d'encapsulation donneraient lieu à de plus vastes applications, telles que des vernis pour murs et fenêtres capables de produire de l'électricité.

Des entreprises qui essaient de commercialiser d'autres matériaux solaires flexibles, tels que le semi-conducteur à base de séléniure de cuivre, indium et gallium (CIGS), ont réalisé des progrès. Les technologies d'encapsulation fonctionnent bien, mais ces entreprises peinent à gagner des parts de marché par rapport au silicium, parce que leurs cellules ont un rendement inférieur et coûtent plus cher. Les pérovskites pourraient profiter de ces progrès dans les techniques d'encapsulation.

Par ailleurs, il ne faut pas seulement empêcher l'humidité de pénétrer dans la cellule. On doit aussi empêcher le contenu des cellules à pérovskite d'en sortir, en raison de la petite quantité de plomb ajoutée à la recette. Le plomb est toxique, et le marché exigera des preuves solides que ces cellules sont sans danger. Pour trouver l'inspiration, les chercheurs peuvent là encore se tourner vers un matériau solaire alternatif, le seul en dehors du silicium à s'être taillé un succès commercial sérieux : le tellurure de cadmium (CdTe).

Fabriqués par la société américaine First Solar, les panneaux à tellurure de cadmium ont été déployés dans le monde entier et ont largement satisfait aux normes de sécurité malgré la présence de cadmium, élément beaucoup plus toxique que le plomb. Les panneaux de First Solar seraient tellement étanches qu'aucun cadmium ne pourrait s'en échapper, même en cas d'incendie à 1 000 °C. Ces panneaux utilisent un substrat de verre, qui exclut la flexibilité et la légèreté promises par les pérovskites. Mais les entreprises qui font le pari de la pérovskite peuvent s'inspirer du succès de First Solar dans l'étanchéification de leurs produits et dans la rigueur de leurs tests.

Un autre développement encourageant relatif au plomb a récemment été annoncé par le MIT (l'Institut de technologie du Massachusetts). Angela Belcher et ses collègues ont montré que les batteries automobiles au plomb peuvent être recyclées en toute sécurité, en récupérant le contenu en plomb pour en faire des cellules à pérovskites. Ce pourrait être un atout environnemental important. Angela Belcher estime que le plomb d'une seule batterie automobile permettrait de produire environ 700 mètres carrés de cellules à pérovskite qui, avec un rendement de 20 %, suffiraient à alimenter 30 maisons individuelles dans un climat chaud et ensoleillé tel que celui de Las Vegas.

Une piste différente serait d'éliminer complètement le plomb. Notre équipe et une autre de l'université Northwestern ont publié des résultats préliminaires sur des cellules utilisant de l'étain à la place du plomb. Mais le rendement et la stabilité sont moins bons, parce qu'avec le temps l'étain a tendance à faire perdre à la pérovskite sa structure cristalline, ce qui réduit la capacité des électrons à sortir de la cellule.

En plus des problèmes cités ici, les chercheurs doivent en résoudre un autre, plus mineur et plus singulier. Certains critiques ont affirmé que les chiffres du rendement des cellules à pérovskites pourraient être gonflés à cause de l'hystérésis, une instabilité de la mesure vraisemblablement due à des molécules chargées qui migrent d'un côté à l'autre de la cellule, créant l'illusion d'un courant plus intense. Mais cette migration des ions est très brève. Les scientifiques recherchent des moyens de la stopper, mais à court terme il y a un remède simple: attendre que cette migration se fasse et mesurer le rendement sur une période plus longue.

Standardiser les mesures

Dans la plupart des cas, ce procédé fournit des valeurs du rendement qui sont comparables aux mesures initiales rapides, mais les chercheurs pourraient être tentés de n'annoncer que le rendement le plus élevé ayant été mesuré. Nous travaillons avec des chercheurs du monde entier afin de standardiser le procédé de mesure, afin que nos résultats soient irréprochables.

Enfin, pour réussir commercialement, les pionniers des pérovskites doivent fournir un scénario économique convaincant pour attirer les investissements nécessaires à une montée en puissance de la production. Bien que les matériaux de base des pérovskites soient abondants et que les cellules puissent être fabriquées à basse température à partir de films produits par des équipements bon marché, les entreprises jouant la carte des pérovskites solaires ne devraient pas tomber dans le piège de la compétition sur le même terrain que le silicium. Il y a en effet peu de marge pour concurrencer les panneaux au silicium, car l'essentiel du coût d'une installation n'est pas dû aux panneaux, mais, entre autres, aux matériaux de l'installation et à la main-d'œuvre, aux permis et inspections associés, ainsi qu'à d'autres dépenses liées à l'installation du système.

En 2014, une installation solaire résidentielle moyenne aux États-Unis revenait à 3,48 dollars par watt de capacité de production électrique, dont seulement 0,72 dollar pour le panneau solaire lui-même. Même si les panneaux à pérovskite parviennent à descendre jusqu'à 0,10-0,20 dollar par watt,



Climat
Relever le défi du réchauffement

À la veille de la COP21, nous devons tous prendre conscience des risques, scientifiquement établis, liés au réchauffement climatique : fonte de la banquise arctique, acidification des océans, augmentation de la température moyenne... Peut-on encore agir pour limiter les dégâts ? Oui - et ce numéro donne de nombreux exemples de projets en cours comme la grande muraille verte plantée en bordure du Sahara ou l'alimentation en énergies renouvelables d'une île entière aux Canaries.

120 pages - 7,50€

Disponible en kiosque
et sur www.pourlascience.fr

ce que les chercheurs pensent possible, cette amélioration ne ferait baisser que marginalement le prix de l'installation finale.

Les entreprises misant sur les pérovskites peuvent néanmoins multiplier ces petites économies en concevant des produits aux rendements supérieurs à celui du silicium. Un panneau solaire à pérovskite de haut rendement réduit le coût total installé par watt en nécessitant moins de surface (de toit ou au sol) et par conséquent moins de main-d'œuvre et d'équipement. Et l'on aurait intérêt à vendre des produits à pérovskite destinés à des applications pour lesquelles le silicium ne peut pas rivaliser, par exemple des films photovoltaïques pouvant être intégrés directement dans les matériaux de construction des murs, des toits et des fenêtres.

La solution hybride : silicium *et* pérovskite

Pour le moment, la meilleure chance qu'auraient les pérovskites pour atteindre le marché serait de s'allier au silicium plutôt que de le concurrencer. Les pérovskites pourraient littéralement se greffer sur le succès du silicium, et ainsi accéder à un marché de 40 milliards d'euros.

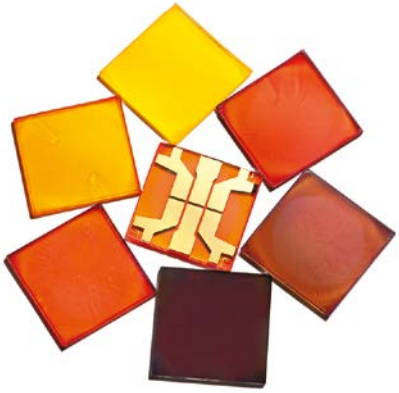
Une alliance pourrait voir le jour en superposant une couche de pérovskite à une couche de silicium, ce qui créerait une cellule photovoltaïque en « tandem » *(voir l'encadré page 64)*. Les pérovskites sont performantes pour exploiter les couleurs de plus haute énergie de la lumière solaire, tels le bleu et l'ultraviolet, que le silicium ne capture pas, ce qui permet d'obtenir une tension plus élevée. Des chercheurs de l'université Stanford et du MIT ont récemment superposé une cellule à pérovskite à une cellule au silicium hermétique, faisant ainsi passer son rendement de 11 à 17 %. Ils ont également assemblé une cellule en tandem en superposant de la pérovskite à du silicium non étanchéifié, créant une structure unique. Cette combinaison atteignait tout juste 14 % de rendement, mais ce chiffre pourrait certainement être augmenté grâce à une fabrication améliorée. En s'appuyant sur ces deux expériences, les chercheurs ont esquissé un scénario où une cellule en tandem constituée d'un composant au silicium et d'un dispositif à pérovskite, astucieusement combinés, pourraient dépasser les 30 % de rendement, sans changement radical de l'une ou l'autre technologie.

Si un panneau solaire en tandem atteignait un rendement de 30 %, l'impact sur le coût d'équilibre du système serait énorme : il y aurait besoin d'un tiers de panneaux en moins pour produire la même quantité d'électricité que des panneaux à rendement de 20 %, ce qui diminuerait considérablement la surface de toit ou de terrain nécessaire, les matériaux d'installation, la main-d'œuvre et l'équipement. Oxford Photovoltaics s'associe à des fabricants traditionnels de panneaux au silicium pour accroître le rendement de la cellule au silicium grâce à un revêtement de pérovskite ; l'entreprise vise une production pilote cette année. À plus long terme, des revêtements solaires peu coûteux, intégrés aux toitures ou aux vitrages, pourraient transformer toute la structure de coûts d'un bâtiment solaire.

Le rapide essor des cellules photovoltaïques à pérovskite a inspiré les scientifiques et les ingénieurs pour fabriquer d'autres types de produits susceptibles de déboucher un jour sur une commercialisation. Avec nos collègues de l'université de Cambridge, nous avons récemment créé des diodes électroluminescentes (LED) et des lasers utilisant des pérovskites à halogénure de métal, qui émettent efficacement la lumière (au lieu de l'absorber) par un processus dit de luminescence.

Ce renversement n'est pas vraiment étonnant ; quand on la fait fonctionner à l'envers, la cellule photovoltaïque la plus efficace au monde (à l'arséniure de gallium) se comporte comme une LED. Des LED et lasers imprimables bon marché pourraient conduire à des applications intéressantes, depuis l'éclairage à grande échelle jusqu'à l'imagerie médicale.

La recherche sur ces produits innovants en est à ses débuts, bien sûr, mais nous pensons que ces travaux vont se multiplier. Avec les pérovskites, les scientifiques sont comme des enfants dans un magasin de bonbons. Ils ont trouvé un matériau dont les propriétés remplissent presque toutes les exigences de leur cahier des charges, notamment le haut rendement, le bas coût, la légèreté, la flexibilité et l'esthétique. Il faudra un effort concerté et mondial de la recherche, de l'industrie et des gouvernements pour concrétiser pleinement le potentiel des pérovskites à nous emmener au-delà de l'ère du silicium. Mais étant donné l'enjeu – une énergie propre et bon marché et une électronique de nouvelle génération –, les pérovskites nous semblent un bon pari. ■



LES FILMS DE PÉROVSKITE peuvent prendre diverses couleurs et pourraient être appliqués sur des fenêtres ou des murs, ce qui, en plus de produire de l'électricité, colorerait ces surfaces.

BIBLIOGRAPHIE

S. D. Stranks et H. J. Snaith, **Metal-halide perovskites for photovoltaic and light-emitting devices,** *Nature Nanotechnology*, vol. 10, pp. 391-402, 2015.

N. J. Jeon *et al.*, **Compositional engineering of perovskite materials for high-performance solar cells,** *Nature*, vol. 517, pp. 476-480, 2015.

M. A. Green *et al.*, **The emergence of perovskite solar cells,** *Nature Photonics*, vol. 8, pp. 506-514, 2014.

C'EST POUR VOUS

France culture

LA MARCHE DES SCIENCES

DÉCOUVERTES INVENTIONS AVENTURES SAVANTES AU FIL DE L'HISTOIRE



AURÉLIE LUNEAU
CHAQUE JEUDI
14H - 15H

en partenariat avec POUR LA SCIENCE

Écoute, réécoute, podcast
franceculture.fr

Opération Je m'engage pour le climat

Belin: ÉDITEUR INDÉPENDANT DEPUIS 1777 — Le Pommier — POUR LA SCIENCE

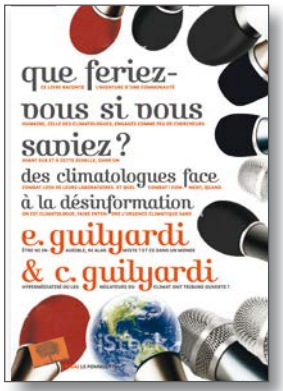
À l'approche de la COP21,

pour nourrir la réflexion et permettre à chacun de prendre connaissance d'ouvrages fondamentaux sur la question climatique, nous vous présentons un cahier spécial mêlant livres de qualité et manifestes d'auteurs. Ce cahier spécial est disponible sur le site de Pour la Science.

De plus, nous vous proposons, avec l'accord des auteurs, de consulter gratuitement les livres de cette double-page et de bien d'autres sur le site de Pour la Science du 23 novembre au 15 décembre 2015.







Ref. 74650935

Ce livre propose le témoignage croisé et rare d'un climatologue sur le défi que lui et ses collègues relèvent en communiquant vers le grand public une science complexe et en constante évolution, et d'une journaliste sur le défi de relayer, dans un environnement médiatique profondément transformé, les résultats de ces recherches sur le climat.

Éditions Le Pommier 2015
200 pages - 17 € - 978-2-7465-0927-6



Ref. 70119162

Chacun sait que les activités humaines bouleversent notre environnement à l'échelle de la planète. Beaucoup ignorent qu'elles modifient aussi profondément notre santé. Réchauffement climatique, vieillissement de la population, pollutions multiples… sont autant de facteurs qui influent de manière préoccupante sur notre capital santé.

Éditions Belin 2015
352 pages - 20 € - 978-2-7011-9162-1



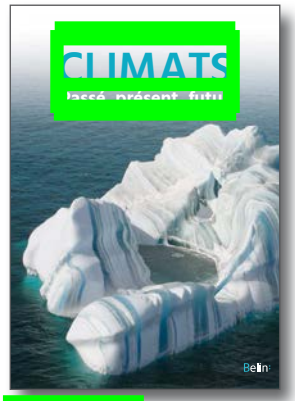
Ref. 70116190

Le changement climatique en cours et les multiples agressions dont sont victimes les plantes affectent leur fonctionnement et la production agricole. Or notre nourriture, l'air que nous respirons et notre survie dépendent des plantes. Nous devons apprendre à renouer avec la complexité de la nature pour s'en faire une alliée.

Éditions Belin 2015
352 pages - 21 € - 978-2-7011-6196-9

Nos partenaires

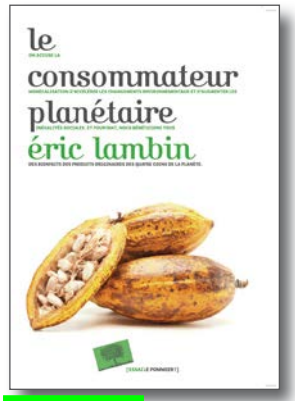
France Inter — Amosti, Les sciences et techniques en culture — Cité des sciences & de l'industrie — www.paris.fr/bibliotheques — Les Messagers du Cl!mat — Météo France



Ref. 70119624

Comprendre les climats passés pour appréhender le changement climatique en cours: telle est l'originalité de ce livre ambitieux. Le réchauffement peut alors être apprécié à l'aulne des changements passés, des conséquences attendues et des variations naturelles qui peuvent le renforcer ou l'atténuer. Un ouvrage de référence sur le sujet.

Éditions Belin 2015
416 pages - 34 € - 978-2-7011-9624-4



Ref. 74650731

Sommes-nous à l'aube d'une prise de pouvoir du consommateur planétaire responsable ? La consommation peut-elle être plus qu'une quête matérialiste et inclure une dimension altruiste, en faveur d'un monde plus durable et équitable ?

Éditions Le Pommier 2015
280 pages - 22 € - 978-2-7465-0733-3



Ref. 74650927

Sébastien Balibar propose un manifeste, clair et documenté, mettant à plat tous les problèmes liés à l'énergie et au climat. Quelles solutions pour que les États agissent enfin ensemble et évitent ainsi la catastrophe naturelle annoncée ? Un livre qui s'adresse à tous !

Éditions Le Pommier 2015
200 pages - 17 € - 978-2-7465-0927-6

Rendez-vous sur www.pourlascience.fr

BON DE COMMANDE

POUR LA SCIENCE

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

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

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

Je m'engage pour le climat

J'indique mes coordonnées

Nom :
Prénom :
Adresse :
C.P. : Ville :
Pays : Tél. :
E-mail* :

Je choisis mon mode de règlement

❑ par chèque à l'ordre de *Pour la Science*
❑ par carte bancaire
Numéro
Date d'expiration
Cryptogramme

Signature obligatoire

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

POUR LA SCIENCE
Belin éditeur indépendant depuis 1777
Le Pommier

DPI 89/offre

Les VILMORIN
des botanistes d'exception

La famille Vilmorin a marqué le domaine de la botanique. Pendant près de 200 ans, six générations de passionnés ont, les unes après les autres, révolutionné le commerce scientifique des graines en les sélectionnant pour obtenir les meilleures plantes. Ces marchands naturalistes ont aussi constitué un herbier singulier, classé Monument historique en 2006, qui va bientôt voir ses plus belles planches numérisées sous l'égide du Muséum national d'histoire naturelle. Christine Laurent raconte cette formidable aventure familiale dans son livre *L'herbier Vilmorin* (Belin) dont voici le premier chapitre consacré à la vocation du fondateur de la lignée Philippe-Victoire de Vilmorin à Paris en 1760.

Christine Laurent

L'aventure de la famille Vilmorin prend racine dans les voyages des botanistes autour du monde, dans leurs explorations curieuses, parfois dangereuses, souvent inconfortables, à la découverte des plantes qui recouvrent la peau de la Terre. Dans le sillage de Christophe Colomb, ces naturalistes ont pris la mer pour décrire et rapporter toutes ces richesses vivantes que l'on nomme aujourd'hui la biodiversité.

Celle-ci s'éclaire des Lumières du XVIII[e] siècle, qui portent sur le végétal un regard nouveau, plus scientifique qu'utilitaire.

Les premiers jardins botaniques, nés dans les cités italiennes de Padoue, de Pise, de Florence avec la Renaissance, essaiment dans toute l'Europe. Ils sont contemporains des premiers herbiers qui permettent de figer dans le temps les plantes éphémères.

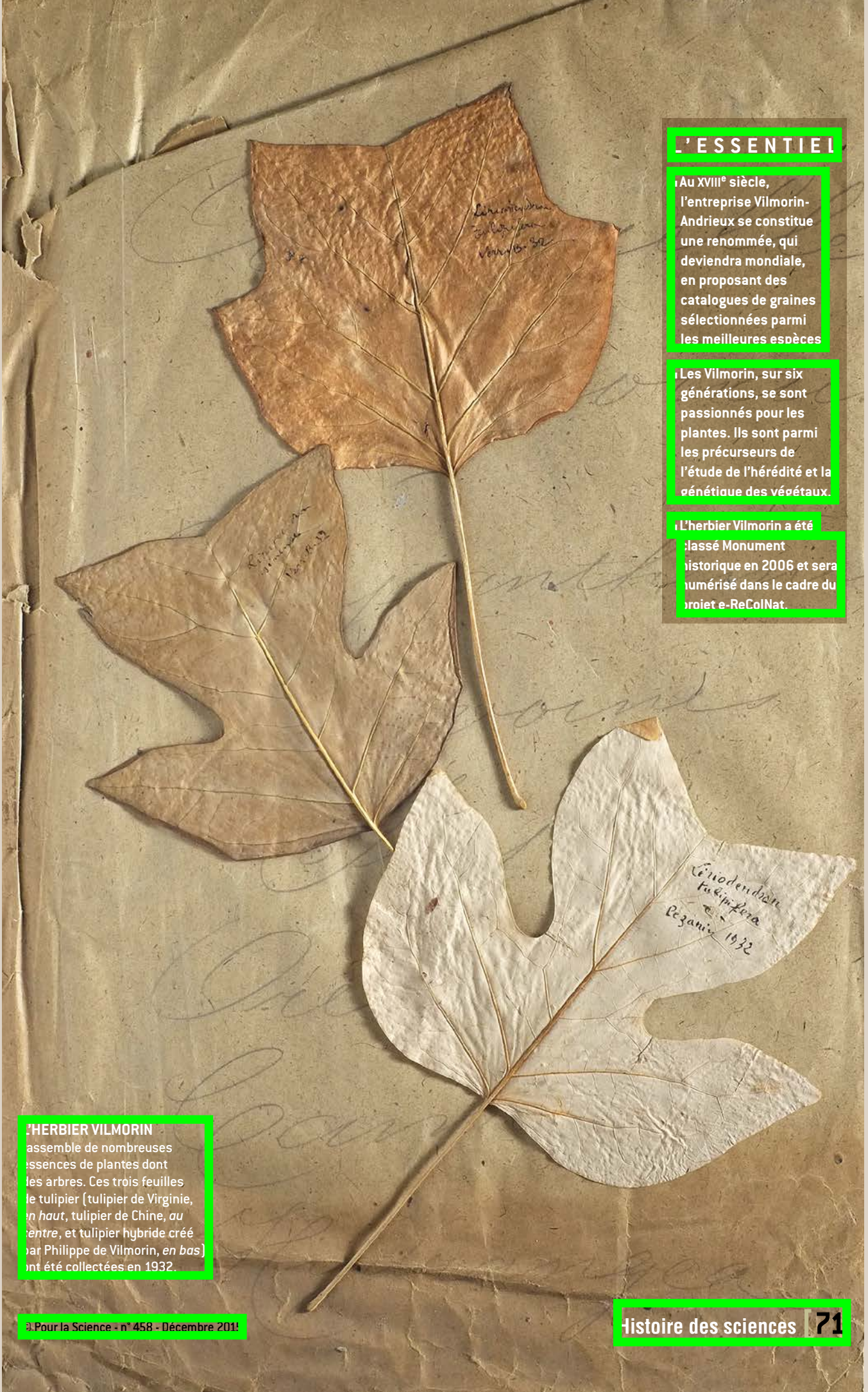
À Montpellier, Strasbourg, Paris, Berlin, Londres, Leyde, Amsterdam, des jardiniers observateurs et astucieux tentent de faire pousser, avec plus ou moins de succès selon le climat d'origine des plantes, les trésors du monde végétal ayant survécu aux traversées houleuses de l'océan.

Le « droguier » de Guy de la Brosse, médecin du roi Louis XIII, installé en 1635 sur la rive gauche de la Seine pour accueillir des plantes médicinales, devient un Jardin royal (le futur Jardin des plantes), alimenté par les botanistes voyageurs qui parcourent le Nouveau Monde à bord de navires affrétés par Louis XV. Joseph Pitton de Tournefort, Antoine et Bernard de Jussieu, puis le comte de Buffon ont hissé ce jardin au rang de référence mondiale de la botanique.

Enfin, l'aventure des Vilmorin, qui débuta au XVIII[e] siècle et se prolongea jusqu'au XX[e] siècle, se nourrit de l'engouement manifesté pour ces

L'ESSENTIEL

- Au XVIII[e] siècle, l'entreprise Vilmorin-Andrieux se constitue une renommée, qui deviendra mondiale, en proposant des catalogues de graines sélectionnées parmi les meilleures espèces
- Les Vilmorin, sur six générations, se sont passionnés pour les plantes. Ils sont parmi les précurseurs de l'étude de l'hérédité et la génétique des végétaux.
- L'herbier Vilmorin a été classé Monument historique en 2006 et sera numérisé dans le cadre du projet e-ReColNat.



L'HERBIER VILMORIN assemble de nombreuses essences de plantes dont des arbres. Ces trois feuilles de tulipier (tulipier de Virginie, *en haut*, tulipier de Chine, *au centre*, et tulipier hybride créé par Philippe de Vilmorin, *en bas*) ont été collectées en 1932.



PHILIPPE-VICTOIRE DE VILMORIN (1746-1804), le premier d'une grande famille de botanistes et de marchands de graines.

nouvelles plantes par des bourgeois enrichis, acquis aux idées nouvelles qui font débat dans les salons. Rares, fragiles, domestiquées à force de soin et d'attention, celles-ci sortent peu à peu des jardins botaniques pour de nouvelles vies à l'abri des serres et dans les jardins des hôtels particuliers des élites.

Au début était le commerce des graines

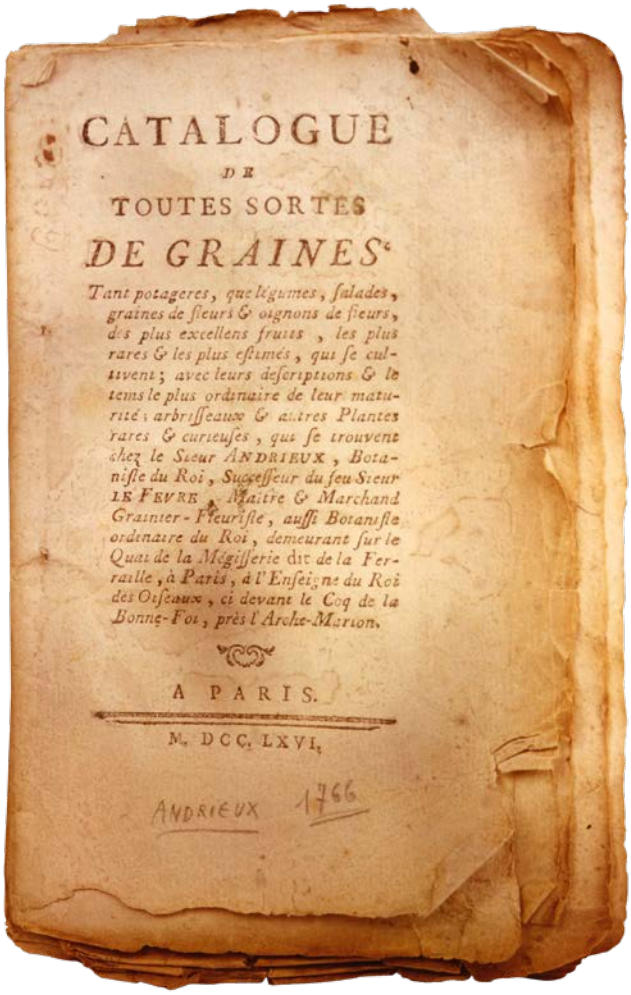
Quand Philippe-Victoire Levêque de Vilmorin débarque à Paris autour de 1760, la ville est partout en chantier au-delà de l'enceinte du roi Philippe-Auguste. On aménage le Champ de Mars, on plante des arbres le long des boulevards. On poursuit la construction d'hôtels particuliers avec jardins sur les faubourgs, à Saint-Germain et Saint-Honoré ou vers la chaussée d'Antin.

Le jeune homme est âgé de 13 ans. Il vient de Landrecourt, en Lorraine, où son père agriculteur-laboureur est mort il y a peu de temps. Certes, la famille a des terres, mais, dernier-né de dix enfants, il n'a guère de perspective. À Paris, il reçoit l'aide de son parrain Philippe Dessofy, un ancien hussard d'origine hongroise, capitaine au régiment de Linden, et de sa marraine, Victoire Claussin, fille d'un magistrat. Il peut suivre des études de médecine et de botanique. À cette époque, ces deux disciplines vont de pair, les plantes médicinales procurant les remèdes aux désordres physiologiques des humains.

Philippe-Victoire découvre le Jardin royal, ses collections de plantes extraordinaires, son cabinet d'histoire naturelle où sont rassemblées graines et plantes séchées des lointaines contrées, ses savants, ses jardiniers et les curieux, comme lui, qui viennent s'y promener.

C'est ainsi qu'il fait la connaissance de Pierre Andrieux, « marchand grainier et botaniste du Roi Louis XV », dont l'enseigne « Au Roi des oiseaux » est installée quai de la Mégisserie à Paris. Achetée au sieur Lefèvre, cette maison grainière est connue pour être la première à avoir vendu des semences aux particuliers dès la fin du XVII[e] siècle. Elle se trouve à deux pas du « marché aux herbes », où les maraîchers viennent vendre leur production avant de se ravitailler en nouvelles graines. La boutique est aussi fréquentée par les gros fermiers de la Brie et de la Beauce. L'homme, plus âgé que lui, est passionné de botanique et d'art des jardins.

L'amitié naît rapidement entre eux. Pierre Andrieux l'associe à ses études et à son commerce de graines. Quelques années plus tard, il lui donne la main de sa fille Adelaïde. La noce a lieu le 14 juillet 1774. Son ami Auguste Parmentier est son témoin de mariage. À partir de 1775, la maison de commerce prend le nom d'Andrieux et Vilmorin. À la mort de Pierre Andrieux en 1779, Philippe-Victoire de Vilmorin reste seul propriétaire de la maison. Il inverse les deux noms, marquant son attachement à l'homme auquel il devait sa bonne fortune.


CATALOGUE
DE
TOUTES SORTES
DE GRAINES
Tant potageres, que légumes, salades, graines de fleurs & oignons de fleurs, des plus excellens fruits, les plus rares & les plus estimés, qui se cultivent; avec leurs descriptions & le tems le plus ordinaire de leur maturité; arbrisseaux & autres Plantes rares & curieuses, qui se trouvent chez le Sieur ANDRIEUX, Botaniste du Roi, Successeur du feu Sieur LE FEVRE, Maître & Marchand Graintier-Fleuriste, aussi Botaniste ordinaire du Roi, demeurant sur le Quai de la Mégisserie dit de la Ferraille, à Paris, à l'Enseigne du Roi des Oiseaux, ci devant le Coq de la Bonne-Foi, près l'Arche-Marion.
A PARIS.
M. DCC. LXVI.
ANDRIEUX 1766

BOTANISTE DU ROI, Pierre Andrieux s'était distingué par ses catalogues de graines. Celui-ci a été publié en 1766. Son association avec Philippe-Victoire de Vilmorin marqua le début de l'entreprise familiale.

Naissance des catalogues

Jusque-là, le commerce des graines était limité à un approvisionnement régulier des clients avec des produits de bonne qualité. Pierre Andrieux avait commencé à se distinguer au sein de la corporation des maîtres graniers en publiant des catalogues. Un des plus anciens qui soit parvenu jusqu'à nous date de 1766.

Sous la plume de Philippe-Victoire de Vilmorin, ce *Catalogue de toutes sortes de graines* devient en 1771 un *Catalogue raisonné de plantes, arbres et arbustes dont on trouve des graines, des bulbes et du plant chez le sieur Andrieux*. Pour le réaliser, il s'est fait aider par un éminent professeur de botanique, Antoine-Nicolas Duchesne. Alors que la classification de Linné est encore contestée par les ténors du Jardin royal des plantes médicinales et que la Société linnéenne de Paris ne sera créée qu'en 1787, la couverture du catalogue indique que les plantes sont désignées selon la nomenclature de Linné.

Une petite explication s'impose : Carl von Linné est un précurseur dans l'art de classer les plantes. Au milieu du XVIII[e] siècle, le savant suédois décide de mettre un peu d'ordre dans trois siècles d'accumulation et de dispersion des espèces végétales. En effet, variant au gré des échanges et des acclimatations, des dizaines de milliers de plantes sont connues sous des noms vernaculaires donnés par les jardiniers qui les ont fait pousser. Dans son ouvrage *Species plantarum* (les espèces de plantes) publié en 1753, Linné s'appuie sur une définition de l'espèce vue comme « un ensemble d'individus qui engendrent par la reproduction d'autres individus semblables à eux-mêmes » et sur la sexualité des plantes, découverte au siècle précédent, pour décrire huit milles végétaux et les nommer de manière systématique. Il imagine une nomenclature en latin dite « binominale » car chaque espèce a un nom composé de deux mots : le nom du genre auquel l'espèce est rattachée et une épithète spécifique.

Ce travail a permis d'épurer la multiplicité des noms donnés à des plantes similaires ou des plantes très différentes qui portent le même nom, puis de les organiser selon une nomenclature compréhensible dont les règles vont évoluer au cours du temps et des moyens d'investigation du monde végétal. En effet, si la classification des plantes de Linné en fonction du nombre des étamines (organes mâles) logées dans le pistil (organe femelle) de la fleur s'est avérée simpliste, sa nomenclature dite « binominale » est toujours en vigueur aujourd'hui.

Premières sélections de plantes

Fort de ses études et des relations qu'il a établies avec toute une génération de jeunes savants, botanistes et jardiniers, parmi lesquels Antoine-Auguste Parmentier, André Thouin, André Michaux et Pierre Marie-Auguste Broussonnet, Philippe-Victoire de Vilmorin conçoit l'idée de rendre populaires des espèces de plantes que l'on ne trouve alors que dans les jardins du roi ou de quelques amateurs éclairés. Il veut commercialiser toutes les bonnes variétés de plantes disponibles en France ou à l'étranger auprès de ses homologues marchands de graines ou des cultivateurs qui ont, année après année, sélectionné les graines des meilleures plantes de leurs champs, améliorant des espèces ou des variétés de choux, de navets, de fèves, de cardons… Philippe-Victoire est ainsi à l'origine de la diffusion de la betterave sucrière, du rutabaga et de diverses variétés de pommes de terre et de tomates.



CE FRAISIER SAUVAGE a été rapporté de Turquie. Les fraisiers étaient la spécialité d'Élisa Vilmorin (1826-1868), la femme de Louis, une des premières femmes botanistes du monde.

Parmi ses correspondants, la figure généreuse d'André Thouin va jouer un rôle déterminant. Philippe-Victoire de Vilmorin correspond avec le jardinier en chef du Jardin royal depuis 1767, comme l'attestent une centaine de lettres consignées dans les archives du Muséum national d'histoire naturelle de Paris. André Thouin est comme lui curieux et passionné par tout ce qui touche aux plantes et à leur culture. Depuis l'enfance, il a suivi son père dans les allées du Jardin royal. Il est si doué qu'à 17 ans, en 1763, le comte de Buffon le nomme jardinier en chef en remplacement de son père, qui vient de mourir. C'est lui qui va donner au Jardin royal la physionomie qu'on lui connaît aujourd'hui, doublant sa surface et multipliant les arbres étrangers utiles afin de les répandre dans le royaume. Il crée d'immenses serres pour accueillir les plantes fragiles que les voyageurs-botanistes lui rapportent des expéditions qu'il organise et que le comte de Buffon finance sur les deniers royaux. Toutes celles qui arrivent au Jardin royal sont étiquetées et reçoivent les premiers soins de l'habile jardinier. Il dirige son attention sur celles qui lui semblent dignes d'intérêt et s'applique à les multiplier. André Thouin devient par degrés le centre d'une correspondance qui s'étendra à toutes les parties du monde et dont l'objet est « de faire circuler de toutes parts et dans tous les sens les productions végétales », résume le baron Cuvier dans un éloge historique.

Ainsi, Philippe-Victoire est en contact avec l'homme qui est au cœur de la diffusion des graines et des semences. Il partage avec lui la volonté de répandre dans les campagnes toutes les plantes utiles aux hommes. Qu'André Thouin lui ait fourni directement des graines ou qu'il l'ait conseillé pour bien les acclimater, il n'est pas étranger à l'enrichissement du catalogue de vente Vilmorin-Andrieux.

Ce sont des dizaines de plantes, dites « d'orangerie », qui vont être inscrites avant

a Révolution française. À titre d'exemple, viennent d'Amérique centrale le mimosa de Farnèse *(Vachellia farnesiana)* et le haricot caracolle *(Cochliasanthus caracalla)* ; d'Asie, le lilas de Perse *(Melia azedarach)* et le jasmin jonquille *(Jasminum odoratissimum)* ; d'Afrique du Sud, l'aloès panaché *(Aloë variegata)*, la fausse bruyère du Cap de Bonne-Espérance *(Phylica ericoides)*, dix espèces de géraniums et la queue de lion *(Phlomis leonurus)* ; d'Asie Mineure, le caroubier *(Ceratonia siliqua)* ; des Açores, le jasmin de Madère *(Jasminum azoricum)* ; d'Italie, l'oranger bergamote *(Citrus bergamia)* et le myrte de Tarente *(Myrtus communis var. mucronata)*.

Les arbres aussi

Grâce à une autre de ses relations amicales, André Michaux, il va diffuser en nombre diverses espèces d'arbres que son beau-père Pierre Andrieux avait commencé à commercialiser, comme le tulipier de Virginie *(Liriodendron tulipifera)*, le cyprès de Louisiane et divers chênes d'Amérique, et il va aussi développer une activité de pépiniériste avec ces arbres du Nouveau Monde. André et Philippe, tous les deux fils d'agriculteur, ont étudié la botanique à la même époque. En 1779, André Michaux obtient son brevet de botaniste, part en Angleterre et séjourne à Kew Garden. À son retour, il participe à une expédition botanique organisée par le naturaliste Jean-Baptiste de Lamarck en Auvergne. Il y gagne sa place de botaniste-voyageur pour des expéditions plus lointaines, vers la Perse et le Caucase. Les nombreuses récoltes qu'il en rapporte ravissent André Thouin. Parmi elles, deux espèces d'arbres, le pterocaryer *(Pterocarya pterocarpa)* et le faux-orme de Sibérie *(Zelkova crenata)*, vont connaître un essor remarquable comme arbres d'ornement. À peine est-il rentré à Paris que le nouvel organisateur des expéditions royales l'envoie dans la toute jeune République d'Amérique. Cette fois, Michaux emmène son fils François-André. Ensemble, ils écument tout l'est de l'Amérique du Nord, de la baie de Hudson à la Floride.

Philippe-Victoire de Vilmorin fait venir une grande quantité de graines de cyprès de Louisiane, de tulipier de Virginie, de mûrier rouge, de liquidambar, de cirier, de thuya *(Thuya occidentalis)*, de noyer *(Juglans)*, de magnolia *(Magnolia macrophylla)*, de chêne *(Quercus macrocarpa)*. Il s'attelle à les faire pousser dans un jardin d'essai installé à Reuilly, au-delà du faubourg Saint-Antoine, où, en plus de son jardin du centre de Paris, il teste ses nouvelles acquisitions avant de les diffuser. Ses observations deviennent des conseils de culture pour les nouveautés inscrites à son catalogue et dont les noms seront reproduits en tête du *Bon Jardinier*, un almanach publié année après année depuis 1755 et dans lequel, à partir de 1778, la maison Vilmorin-Andrieux fera connaître les nouvelles plantes qu'elle met dans le commerce et ce jusqu'à la dernière édition en 1962.



SIX GRANDS PRIX SONT ATTRIBUÉS à l'entreprise Vilmorin-Andrieux lors de l'Exposition universelle de 1900, à Paris, comme le mentionne la couverture du catalogue de 1901.

Naissance d'une nouvelle forme d'agriculture

À la veille de la Révolution, l'entreprise Vilmorin-Andrieux est une référence au sein de la corporation des marchands grainiers. Le baron le Bon de Poederlé la recommande dans son *Manuel de l'arboriste et du forestier* publié en Belgique en 1788. L'année suivante, elle est citée

parmi les grainiers en vogue par l'*Almanach Dauphin*, qui recense les bonnes adresses parisiennes. Parmi ses clients, il y a bien sûr les maraîchers parisiens, estimés à 1 200 familles en 1776, installés dans les faubourgs et plus loin. Ce sont le plus souvent des paysans des régions d'Île-de-France, de Picardie, de Normandie, de la Brie ou de la vallée de l'Yonne qui sont venus s'établir sur des terrains achetés ou loués à bail à de riches propriétaires ou à des congrégations religieuses. Il y a bien sûr les fermiers qui vivent de la culture des céréales ou des plantes fourragères. Il y a aussi toute une clientèle aristocratique et bourgeoise pour laquelle le jardin constitue un signe de position sociale. À l'esthétisme du tracé du jardin, aux plantes incroyables qui arrivent du bout du monde, s'ajoute l'indispensable potager qui garnit en fruits et en légumes la table de son propriétaire quelle que soit la saison. Les productions doivent être belles et goûteuses et se distinguer des légumes qui poussent dans les jardins de paysans.

Quand éclate la Révolution française, Philippe-Victoire de Vilmorin modifie pour un temps son enseigne qui devient « À l'oiseau national ». La Société royale d'agriculture dont il est membre est dissoute. Il participe avec son ami Auguste Parmentier et son confrère Jacques-Philippe Martin Cels, horticulteur derrière la porte du Maine, à la Commission de subsistance et d'agriculture. Il distribue des graines, prend contact avec les gros fermiers des environs de Paris pour assurer le ravitaillement de la capitale, rédige des instructions pour favoriser la culture de la pomme de terre – tubercule encore relégué au rang de sous-nourriture tout juste bonne pour les animaux –, du colza, du trèfle violet et d'autres fourrages facilitant l'alimentation des animaux de ferme.

Il est aussi au côté de son ami André Thouin, lequel préside en 1792 et 1793 une Commission de la recherche des plantes dans les jardins de la liste civile et dans ceux des émigrés. Il s'agit de faire l'inventaire et de récupérer les plantes intéressantes dans les propriétés du roi et les jardins privés des émigrés et des condamnés. Ils vont ainsi enrichir le Muséum national d'histoire naturelle de plus d'un million de spécimens provenant pour un dixième des jardins ayant appartenu à Malesherbes, à Marbeuf, au comte d'Artois, aux Chartreux… Le reste provient des pépinières royales du Roule.

L'entreprise avait été mise à mal par la tourmente révolutionnaire. Mais Philippe-Victoire laissa à la postérité un jardin d'essai, un réseau de correspondants et des notices très utiles sur un grand nombre de plantes. Fort de son expérience, il a aussi publié des mémoires sur la conservation et la préparation des graines, sur les précautions à prendre pour s'assurer de leur bonne qualité et sur les moyens de les employer à la reproduction. À la demande de la Convention, il rédigea une instruction détaillée pour les personnes chargées par le gouvernement de faire des achats à l'étranger. Il y indique les précautions à prendre pour choisir les graines et rapproche les noms systématiques des noms vulgaires sous lesquels les plantes sont connues dans le commerce.

Ainsi, quand mourut en 1804 l'homme qui avait réuni dans son jardin d'essai de la rue de Reuilly toutes les espèces et variétés de plantes alimentaires, fourragères et d'intérêt économique cultivées en France et dans plusieurs pays d'Europe, une nouvelle forme d'agriculture voyait le jour, dans laquelle les semences du professionnel allaient supplanter les graines du paysan. Dans un hommage, le baron Sylvestre, secrétaire perpétuel de la Société d'agriculture, dit de lui que « par ses cultures expérimentales, ses écrits, son activité, son intelligence et ses nombreuses relations commerciales, il a beaucoup contribué à répandre dans les classes aisées le goût du jardinage et de l'agriculture ». ■

L'AUTEUR



Christine LAURENT, historienne de formation, a exercé le métier de journaliste scientifique. Depuis 2001, elle est chargée de mission à la mairie de Paris et travaille actuellement à la direction des espaces verts et de l'environnement.

POUR EN SAVOIR PLUS

C. Trébuchet et C. Gautier, **Une Famille – Une Maison – Vilmorin Andrieux,** Édition de l'Historique de Verrières, 1982.

Le jeudi 3 décembre, de 14h à 15h, Christine Laurent deviendra sur l'histoire de l'herbier des Vilmorin dans l'émission **La marche des sciences** sur *France Culture*. www.franceculture.fr

CET ARTICLE est le premier chapitre du livre de Christine Laurent *L'herbier Vilmorin*, Belin (2015).



Le fils de Philippe-Victoire, Philippe-André, était peu intéressé par les affaires. Il confia la gestion de son commerce des graines et se consacra entièrement à l'étude des plantes. Il acheta une propriété à Verrières-le-Buisson, qui deviendra au fil des générations un centre à la pointe de la recherche agronomique, unique en France. Il y développa des collections d'arbres, mais aussi de betteraves et de pommes de terre (une collection constituée par Auguste Parmentier). Son fils, Louis, a poursuivi l'activité familiale, avec l'aide de sa femme Élisa.
Il s'intéressa, entre autres, à l'hérédité chez les plantes. Le petit-fils de Louis, Philippe, botaniste et voyageur passionné, rapporta de ses expéditions lointaines des plantes séchées, des graines et des plumes d'oiseaux. Il a surtout organisé l'herbier, un catalogue qui rassemble les collections passées, présentes et à venir. Une œuvre inestimable…

Abonnez-vous à POUR LA SCIENCE



En CADEAU de bienvenue :

Une lampe torche solaire* pour vous accompagner cet été dans toutes vos excursions, randonnées, balades...

Un objet malin et écologique qui fonctionne **sans piles ni manivelle**.
Grâce à ses capteurs solaires, cette lampe de poche pourra vous fournir plusieurs heures d'éclairage.

Modèle Medium NEST en aluminium et plastique - Fourni avec 5 Led lumen 30 - Dimension : longueur 12,5 m / diamètre 10 mm - Poids : 87 gr - Valeur : 14 €



OFFRE SPÉCIALE D'ABONNEMENT

POUR LA SCIENCE

découper ou à photocopier et à retourner accompagné de votre règlement :
ervice Abonnements Pour La Science - 19 rue de l'Industrie BP 90053 67402 ILLKIRCH CEDEX

Votre OFFRE
INTÉGRALE

8,20€ par mois seulement

le magazine
+ le hors-série chez vous
+ l'accès numérique illimité
à toutes les archives sur
www.pourlascience.fr



1. MA FORMULE

❑ **OUI, je m'abonne à l'offre « Intégrale » à 8,20€ par mois.**

Je reçois **le magazine *Pour la Science*** (12 nos/an)
+ son hors-série *Dossier Pour la Science* (4 nos/an)
+ mon cadeau. Je bénéficie aussi de l'accès numérique illimité aux archives sur **www.pourlascience.fr.**



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

@

réception de votre bulletin, comptez 5 semaines pour recevoir votre n° d'abonné. Passé ce délai, merci d'en faire la demande à abonnements@pourlascience.fr

2. MES COORDONNÉES

Nom :
Prénom :
Adresse :
Code postal : Ville :
Pays : Tél. :

3. MON MODE DE REGLEMENT

❑ Je règle par prélèvement **8,20€ par mois* et reçois en cadeau la lampe torche solaire** (réf. 00LAM). Je remplis l'autorisation ci-dessous en joignant impérativement un IBAN/BIC.

Pour la France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'Europe (pays de la zone SEPA) : 9,60€ par mois. Abonnement en reconduction tacite dénonçable à tout moment auprès du service abonnement avec un préavis de 3 mois. Conditions complètes sur www.pourlascience.fr

AUTORISATION DE PRÉLÈVEMENT PAR MANDAT SEPA

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

- COORDONNÉES DU TITULAIRE DU COMPTE

Nom, prénom
Adresse

- COORDONNÉES BANCAIRES

IBAN
Numéro d'identification international du compte bancaire – IBAN (International Bank Account Number)

BIC
Code international d'identification de votre banque – BIC (Bank Identifier Code)

POUR LA SCIENCE

Type de paiement : Paiement récurrent/répétitif

- Date et signature obligatoire

Date
Signature

NOM DU CRÉANCIER
Pour la Science – 8 rue Férou – 75006 Paris
ICS N° FR92ZZZ426900
N° de référence unique de mandat (RUM)

Pièce réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

❑ Je préfère régler mon abonnement d'un an en **une seule fois 99€**** **sans bénéficier du cadeau.**

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

❑ Par chèque à l'ordre de *Pour la Science*
❑ Par carte bancaire N°
Date d'expiration Clé

Signature obligatoire

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

OFFRE 2LS4588

LOGIQUE & CALCUL

Faut-il interdire les robots tueurs autonomes ?

Est-il possible de programmer un robot pour qu'il respecte des principes éthiques ? Les lois de la robotique qu'envisageait l'écrivain Isaac Asimov dès 1942 sont brûlantes d'actualité.

Jean-Paul DELAHAYE

En 2029, une guerre oppose humains et machines intelligentes : le robot *Terminator* est envoyé dans le passé pour tuer Sarah Connor, la mère de John Connor... C'est le début d'une histoire qui se développe tout au long des cinq épisodes de la série de films créée en 1984 par James Cameron et dont deux épisodes supplémentaires sont prévus.

La science-fiction n'a pas attendu que la technologie permette d'en fabriquer pour envisager l'idée de robots qui, d'eux-mêmes, une fois lancés dans une mission, prennent la décision de tuer des humains ou même se révoltent. Ces robots tueurs portent un nom savant dans les discussions internationales sur l'armement : SALA, pour *Systèmes d'armes létaux autonomes* (en anglais LAWS, *Lethal Autonomous Weapons Systems*). Ils sont sur le point d'exister, voire existent déjà. Leur introduction sur les champs de bataille suscite des débats où se mêlent des questions logiques, pour les définir ou pour comprendre ce qui leur est possible, et des questions éthiques encore plus délicates que lorsqu'elles concernent les soldats humains.



LES DRONES D'ATTAQUE utilisés par les États-Unis sont supervisés par des opérateurs humains, ce qui pose déjà des questions d'éthique. Certains ont la capacité de faire feu en mode autonome, ce qui suscite d'autres questions.

Dès 1942, dans la revue *Astounding Science Fiction*, le célèbre et prolifique écrivain américain d'origine russe Isaac Asimov avait évoqué la question de l'éthique des robots. Aujourd'hui, il est d'ailleurs considéré comme le créateur de la roboéthique, discipline philosophique donnant lieu à des colloques et à de nombreux livres, en particulier aux États-Unis. Sa nouvelle *Runaround* (*Cercle vicieux*) de 1942 énonce les *Trois lois de la robotique* dont devraient tenir compte les programmes de tout robot pour contrôler les comportements de ces automates et les soumettre à des impératifs moraux protecteurs des humains.

Des lois de la robotique...

Première loi : *Un robot ne peut porter atteinte à un être humain ni, restant passif, laisser cet être humain exposé au danger.*

Deuxième loi : *Un robot doit obéir aux ordres donnés par les humains, sauf si de tels ordres contredisent la première loi.*

Troisième loi : *Un robot doit protéger son existence, sauf si cette protection contredit la première ou la deuxième loi.*

Asimov ajoutera plus tard une autre loi :

Loi zéro : *Un robot ne peut ni nuire à l'humanité ni, restant passif, permettre que l'humanité souffre d'un mal.*

Les difficultés qu'entraîne le respect de ses lois sont le sujet de plusieurs des cinq cents livres qu'Asimov écrivit. Il prenait

ses lois au sérieux et imaginait réellement qu'elles seraient adoptées ; aussi, à la projection du film de Stanley Kubrick *2001, l'Odyssée de l'espace*, il quitta la salle furieux lorsque l'ordinateur HAL 9000 viola la première loi en s'en prenant à un membre de l'équipage du vaisseau spatial *Discovery One*.

Asimov n'a pas été exaucé : les robots actuels n'ont pas en eux de mécanismes ou d'instructions les forçant à se soumettre à ses lois de la robotique. Pourquoi ?

..impossibles à respecter

La première raison est que les robots n'ont pas été créés comme on l'imaginait et avec les qualités que certains voudraient. Les sciences et la technologie n'ont pas soudainement créé des êtres qui nous ressemblent auxquels on parle comme à des esclaves ou des domestiques pour leur expliquer ce qu'ils doivent faire. La venue des robots, et plus généralement des systèmes dotés de parcelles d'intelligence, se fait progressivement en empruntant des voies inattendues et qui rendent difficiles de savoir ce que l'on doit appeler robots, et encore plus de ce qu'on doit considérer comme des systèmes intelligents.

L'automatisme qui fait atterrir votre avion est-il un robot ? Est-il intelligent ? Il est trop facile de répondre non. Il opère aussi bien qu'un humain et sait très précisément où il est (il a donc une forme embryonnaire de conscience de lui-même), ce qui est important pour bien poser l'appareil. Même s'il est très limité, qu'il ne sait ni lire le journal, ni réserver une chambre d'hôtel, ni apprécier un bon film, etc., il nous égale pour un travail que nous n'hésitons pas à considérer comme délicat et important. Les algorithmes des moteurs de recherche d'Internet réussissent à trier de l'information et à nous conseiller sur les pages à consulter comme aucun être humain ne saura jamais le faire. Là encore, il est difficile de savoir si l'on doit parler de robots et d'intelligence, mais c'est se satisfaire à bon compte de décréter que ces algorithmes sont stupides ; ils ne le sont pas, même s'ils ne sont capables que d'un travail spécialisé.

Lois d'Asimov et robots militaires

Isaac Asimov pensait qu'il faudrait garder le contrôle des robots pour éviter qu'ils ne deviennent dangereux et imagina qu'on programmerait en eux

De telles lois de la robotique sont délicates à concevoir, d'où les nombreuses variantes qui en ont été formulées. Surtout, elles exigent des robots un type d'intelligence générale que nous ne savons pas programmer aujourd'hui, ce qui rend impossible leur prise en considération.

Par ailleurs, les robots envahissent nos vies subrepticement, en empruntant des formes différentes de celles que nous avions imaginées... par exemple comme armes autonomes ayant pour seule fonction de tirer sur des humains, ce qui est parfaitement contraire aux lois d'Asimov.

De nombreux systèmes militaires sont le plus souvent télécommandés, c'est-à-dire qu'ils ne prennent pas d'eux-mêmes la décision de tirer ou de faire exploser une charge destructrice. C'est le cas des drones utilisés massivement par l'armée américaine sur divers théâtres de guerre. Cependant, certains systèmes doivent réagir très vite, et on a donc choisi de les programmer pour qu'ils s'enclenchent sans attendre qu'un humain valide les tirs qu'ils proposent d'engager. Ils fonctionnent donc seuls, bien que leur action soit potentiellement mortelle pour les humains. Les systèmes de missiles anti-missiles utilisés par les armées américaine *(Patriot)* et israélienne *(Dôme de fer)* et les robots de contrôle des zones séparant les deux Corées sont de tels systèmes autonomes

tueurs, ou en tout cas susceptibles d'être utilisés sans humains dans la prise de décision. Dans les laboratoires militaires, il en existe sans doute de nombreux autres prêts à fonctionner. Faut-il continuer à en développer ? Faut-il au contraire rechercher des accords internationaux dont les signataires s'engageraient à cesser les travaux sur de telles armes et renonceraient à les utiliser ?

En mai 2013, à une réunion de l'organisation *Human Rights Council*, qui dépend des Nations unies, la France indiquait qu'elle ne détenait pas d'armes robotisées capables de décider seules de faire feu, et qu'elle n'avait pas l'intention d'en acquérir : « Notre conception est fondée sur la responsabilité totale des dirigeants militaires et politiques pour décider de l'usage de la force armée. La France considère qu'il faut préserver le rôle des humains dans la décision d'ouvrir le feu. »

En raison de cette spécialisation et de l'impossibilité d'une communication par le langage courant, on ne peut pas donner aux robots la consigne de respecter les lois de la robotique d'Asimov, dont l'énoncé leur échappe totalement. Pour appliquer ces lois, il faudrait aussi que nos systèmes informatiques disposent d'une faculté d'analyse et de raisonnement s'appliquant à tout, et soient capables d'anticiper les conséquences de telle ou telle action pour déterminer si un ordre contredit ou non la première loi, ou la deuxième, etc. Aucun de nos robots ne sait mener des telles analyses.

Cette impossibilité a été exprimée d'une manière très directe par Rodney Brooks, ingénieur et fondateur de la société américaine iRobot qui conçoit, réalise et vend des robots tels que le *PackBot* utilisé à Fukushima et massivement en Afghanistan. On lui demandait pourquoi ses robots ne sont pas programmés pour se soumettre aux lois d'Asimov ; il répondit : « La raison est simple, je ne peux pas mettre les lois d'Asimov en eux ! » L'intelligence s'insinue dans les systèmes développés aujourd'hui, dont les capacités d'autonomie progressent, mais elle n'est pas du tout semblable à celle d'un humain et cela rend aujourd'hui totalement

illusoire l'idée de leur faire comprendre et respecter les lois de la robotique.

Ne croyons pas pour autant que la prise en compte des problèmes éthiques est superflue et prématurée. Dans le domaine des véhicules autonomes (voitures, camions, autobus, etc.) sur lequel l'industrie travaille intensément et s'apprête à proposer des produits fonctionnant assez bien, le débat est urgent.

Faire face à des dilemmes

Imaginons une voiture autonome sans conducteur devant laquelle un enfant poursuivant un ballon traverse la route, alors que sur la voie en sens inverse arrive un adulte à vélo. Imaginons que le système de conduite automatique, parfaitement maître de la situation, analyse qu'il n'a que deux options : renverser l'enfant et probablement le blesser ou le tuer, ou donner un coup de volant à gauche et percuter le vélo, ce qui risque d'être fatal à l'adulte. Faut-il préserver l'enfant ou l'adulte ? Autre exemple de dilemme : faut-il se jeter sur un arbre avec tous les risques que cela entraîne pour les passagers, ou rester sur la route en fonçant sur la voiture qui arrive droit en face en doublant un camion ?

On présente souvent les systèmes de conduite automatique de véhicule, une fois bien mis au point, comme de meilleurs conducteurs que les humains, et donc comme un élément de sécurité nouveau. Il n'est ainsi pas question, à terme, de les interdire. Dans les situations envisagées, leurs capacités à réagir et à choisir pourraient être parfaites : ils décideront, en fonction de ce qui aura été programmé, de sauver l'enfant au ballon ou le cycliste ; d'aller droit sur l'arbre ou de rester sur la chaussée en espérant que le véhicule imprudent qui double ira, lui, se jeter sur un arbre.

Qui doit fixer les règles ? Comment ? Répondre à ces questions sera difficile, mais on ne pourra s'en dispenser. Le problème des règles éthiques devient parfois logiquement très compliqué et même indécidable au sens des logiciens, comme des chercheurs l'ont récemment mis en évidence *(voir l'encadré page ci-contre)*.

Il y a une seconde raison, bien plus désolante, pour laquelle les lois de la robotique ne sont pas intégrées : nous fabriquons certains systèmes robotiques dont la fonction est de tuer ! C'est aujourd'hui devenu une question grave, qui doit nous inciter à la réflexion.

Le problème n'est pas tout à fait nouveau et ne devient vraiment délicat que lorsque les trois mots « robot », « autonome » et « tueur » sont associés. Une mine déposée sur un chemin est autonome en ce sens qu'elle « décide » d'exploser quand elle « perçoit » une présence dans son environnement immédiat, et cela sans qu'aucun humain ne valide son choix. De nombreux missiles et bombes n'explosent que lorsqu'un mécanisme sensible détecte leur arrivée au contact de la cible ou du sol. Plus délicat est le cas des missiles qui, une fois lancés, vont inexorablement vers leur cible. On peut penser aux 15 000 missiles V1 et 4 000 V2 envoyés par les nazis pendant la Seconde Guerre mondiale qui, heureusement, étaient peu précis.

L'existence de robots tueurs autonomes, prêts à fonctionner, est souvent considérée comme une certitude.

Plus ennuyeux encore, certains missiles déterminent eux-mêmes leur cible et se dirigent vers elle en analysant le contraste des images (qui permet le repérage des navires en mer) ou en fonction des rayonnements infrarouges. Des systèmes de surveillance frontalière visent et font feu sur toutes les cibles qui franchissent des zones interdites. C'est le cas du *Samsung Techwin surveillance and security guard robot* déployé dans la zone démilitarisée entre les deux Corées. Il est contrôlé par des opérateurs humains, mais a un mode automatique. Certains systèmes antimissiles se déclenchent sans intervention humaine, tel le système américain *Patriot* ou le système israélien *Dôme de fer*.

Notons que les drones utilisés aujourd'hui par les Américains sur de nombreux champs de bataille sont pilotés à distance et maintiennent toujours un humain dans le circuit de décision ; le plus souvent, ils attendent même un ordre explicite d'un officier avant de tirer. On connaît leur efficacité d'engins tueurs… et l'on sait qu'ils font de nombreuses victimes collatérales. Certains d'entre eux peuvent fonctionner en mode automatique, qui leur permet de décider de tirer, sans intervention humaine.

Dans un rapport de 2013 rédigé pour l'ONU, Christof Heyns, professeur de droit à l'université de Pretoria, en Afrique du Sud, considère comme certaine l'existence de systèmes de robots tueurs autonomes, prêts à fonctionner, dans les laboratoires militaires de pays tels que les États-Unis, la Grande-Bretagne, Israël, la Corée du Sud…

Sans aucun doute, nous sommes capables de réaliser et d'utiliser des machines autonomes armées possédant des parcelles d'intelligence et que nous pouvons envoyer sur un champ de bataille ou dans les airs à la recherche d'ennemis qu'elles identifient et tuent sans qu'aucun humain ne valide leur choix. Même si l'on prétend aujourd'hui maintenir un humain dans la boucle de décision, ces systèmes pourraient s'en passer, sans que l'on ait à modifier profondément leur conception.

Où allons-nous ?

La question posée est donc : où allons-nous ? Souhaitons-nous vraiment continuer dans cette direction ? Faut-il limiter ou interdire l'utilisation des telles armes ?

Parmi les arguments donnés pour défendre ces systèmes et la poursuite de leur développement, mentionnons les deux principaux. Le premier est qu'il est trop tard, ces systèmes existant déjà. Le second est que ces armes seront plus précises et, à terme, respecteront mieux les civils et les règles d'une guerre modérée que ne le font les combattants humains : ces armes conduiront à des conflits plus « propres ».

Au premier argument, on peut facilement rétorquer qu'il existe aussi des armes

nucléaires, chimiques, ou bactériologiques et que cela n'a pas empêché la mise en place de traités internationaux pour les réglementer ou les interdire. Ces accords ne sont pas vains, ils ont en effet limité l'usage des armes concernées. Des accords existent à propos des mines antipersonnel et des lasers destinés à aveugler l'ennemi (un accord à leur sujet est entré en vigueur en 1998). On peut donc s'entendre pour cesser de développer les robots tueurs autonomes. Le problème est aujourd'hui en discussion dans les instances internationales et nous avons chacun le pouvoir d'agir pour demander que ces discussions aboutissent rapidement.

Concernant le second argument prétendant que les robots tueurs conduiront à des guerres plus propres, il doit être dénoncé. En effet, il revient à considérer qu'on sait mettre dans les robots tueurs des règles de morale du type « ne s'attaquer qu'aux ennemis », « ne pas viser les civils », « répondre à une attaque de manière proportionnée », etc., alors que justement on ne sait pas plus le faire que programmer les lois de la robotique d'Asimov.

Il faudra peut-être reconsidérer le problème si nous réalisons un jour des robots aux capacités d'analyse améliorées, mais

Le problème du tramway

Les philosophes spécialistes de l'éthique aiment envisager des problèmes imaginaires qui les aident à réfléchir. Le « problème du tramway » est l'un d'eux. Un tramway dont personne n'a le contrôle arrive à toute vitesse sur un aiguillage. Il va emprunter une voie occupée un peu plus loin par cinq personnes qui ne le voient pas venir. Sur l'autre voie, se trouve une seule personne. Devez-vous actionner la manette de l'aiguillage pour sauver les cinq personnes et en condamner une, ou ne pas intervenir dans cette situation dont vous n'êtes pas responsable ?

Saint Paul avait abordé le problème en d'autres termes et avait répondu que les voies du Seigneur sont impénétrables et qu'il ne fallait jamais sacrifier un innocent (par exemple, Dieu avait arrêté le bras d'Abraham). En termes non religieux, il peut arriver quelque chose qui sauvera les cinq personnes sans tuer un innocent.

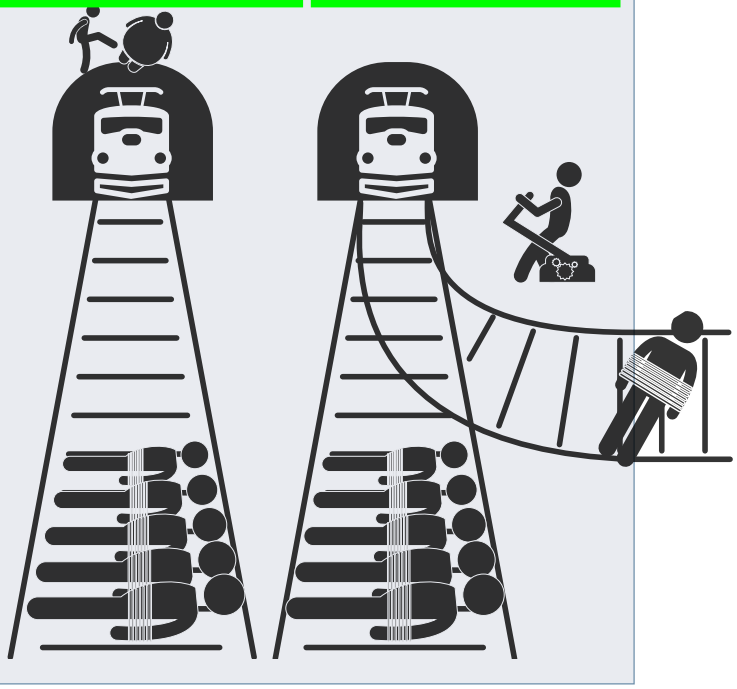
Toutefois, dans sa formulation actuelle, si vous êtes utilitariste et pensez qu'il faut actionner l'aiguillage, vous êtes d'accord avec environ 90 % des gens à qui on pose la question. Supposons maintenant que vous soyez sur un pont. Devant vous se trouve une personne de forte corpulence que vous pouvez pousser sur la voie du tramway qui arrive et va tuer cinq personnes. Si vous la poussez, sa corpulence sera suffisante pour arrêter le tramway : il mourra, mais les cinq personnes seront sauvées. Le faites-vous ?

Sur le plan des vies humaines, le problème est équivalent au précédent. Pourtant cette fois, moins nombreux sont les gens prêts à sacrifier une vie pour en sauver cinq.

Une nouvelle variante a été imaginée récemment par Matthias Englert, Sandra Siebert et Martin Ziegler *(voir la bibliographie)*. Elle montre qu'un robot parfaitement éthique est impossible, du fait de l'indécidabilité algorithmique de certains problèmes.

On imagine un robot devant l'aiguillage, lequel a été informatisé. Le programme qui gère l'aiguillage est disponible, affiché à l'écran. Il a été conçu par un individu suspect. Le robot doit analyser le programme et, selon que le programme permet un usage correct de l'aiguillage ou qu'il a été programmé pour créer des accidents (et par exemple opérer à l'inverse de ce qu'on attend), le programmeur suspect sera félicité ou emprisonné.

La question que doit résoudre le robot est celle de l'analyse d'un programme pour déterminer entre autres choses, si en appuyant sur la commande pour que le tramway passe à gauche, cela produira bien l'effet annoncé. Or ce type d'analyse est algorithmiquement indécidable, comme l'est le problème de savoir si un programme finit par s'arrêter (démontré algorithmiquement indécidable par Alan Turing en 1936). Aucun algorithme, donc aucun robot, ne peut le résoudre de manière générale (c'est-à-dire quel que soit le programme). Bien qu'ici aucune information sur les données ne soit manquante, se comporter éthiquement vis-à-vis du programmeur suspect est impossible pour le robot. Celui-ci rencontrera donc parfois des situations où il ne pourra pas se comporter correctement : un robot parfaitement éthique est logiquement impossible. Les auteurs insistent sur l'idée que leur argument ne s'applique pas aux humains qui, *a priori*, ne sont pas assimilables à des robots.



Un sursaut humaniste

Diverses actions ont été entreprises pour demander l'accélération des discussions internationales sur les SALA (Systèmes [illegible] AWS (pour Lethal Autonomous Weapons Systems) qui doivent conduire à renoncer à les utiliser et à les développer.

Une lettre dans ce sens a été signée en juillet dernier par près de 3 000 chercheurs en intelligence artificielle et robotique et 15 000 autres personnes (http://futureoflife.org/AI/open_letter_autonomous_weapons). On y lit :

« La question clé pour l'humanité aujourd'hui est de choisir entre démarrer une course aux armes munies d'intelligence artificielle, ou éviter qu'elle commence. Si une force militaire majeure s'engage dans le développement de telles armes, une course globale à l'armement sera enclenchée, avec comme issue inéluctable que les armes autonomes deviendront les Kalachnikov de demain. [...] Nous croyons que l'IA est susceptible de nombreuses façons différentes de bénéficier à l'humanité et que cela doit être le but de cette discipline. Entamer une course militaire à l'armement est une mauvaise idée et doit être évité par l'interdiction des armes autonomes offensives échappant à tout contrôle humain. »

Imagine-t-on ce que donnerait un attentat terroriste dans une gare ou un train mené par un ou plusieurs robots tueurs ?



Il est aujourd'hui certain que nous ne savons pas programmer des règles morales du type de celles qu'envisageait Asimov. En résumé : les robots que nous fabriquons sont capables de se déplacer avec une grande précision, de tirer vite et bien, sur des cibles humaines ou non, mais ils ne savent pas décider s'il faut tirer et si oui, sur quoi.

Ceux qui s'opposent aux robots tueurs autonomes avancent d'autres arguments. Une lettre publiée en juillet 2015, signée par près de 20 000 personnes, spécialistes en intelligence artificielle ou personnes se sentant concernées, dont le célèbre physicien Stephen Hawking et le cofondateur d'Apple Steve Wozniak, demande l'arrêt des recherches sur ces systèmes autonomes capables de tuer. Elle évoque l'utilisation possible de ces armes par des terroristes. Le problème est plus grave que pour d'autres types d'armes tels que les bombes atomiques, car la mise au point de robots tueurs autonomes est une affaire de logiciels et de petites technologies largement diffusées. Or un logiciel se duplique et circule facilement, ce qui n'est pas le cas d'une arme nucléaire ! Les éventuels progrès dans le développement des robots pourraient être utilisés par les pires dictateurs ou terroristes ou pour soutenir les causes les moins défendables, qui ne seraient pas nécessairement politiques, mais pourraient aussi être liées au grand banditisme.

Pour formuler des accords internationaux, il reste bien sûr la difficulté réelle à fixer une bonne définition de ce qu'est un robot autonome. Mais est-ce vraiment plus délicat que de déterminer ce qu'est une arme bactériologique, une arme chimique ? Vu l'importance des enjeux, ne peut-on pas se mettre d'accord sur les cas ne présentant aucune ambiguïté ?

On se hâte... lentement

Du 13 au 17 avril 2015, une réunion informelle d'experts sur les systèmes d'armes létaux autonomes (SALA) s'est réunie à Genève ; la France y participait. On y a discuté de la distinction entre automaticité et autonomie, et de la définition qu'il faut donner à l'expression « Contrôle humain significatif ». Dans une réunion l'année précédente, le représentant de la France Jean-Hugues Simon Michel, qui présidait les débats sur les SALA, concluait que « la nature stimulante des armes autonomes s'est ressentie dans le caractère très vivant et animé des débats ». Espérons qu'on saura aller au-delà d'intéressantes discussions...

Notons aussi que, en France, un rapport de 2014 du Cerna (Commission de réflexion sur l'éthique de la recherche en sciences et technologies du numérique d'Allistene) consacré aux robots n'a fait qu'effleurer le sujet. Certains experts français semblent pourtant conscients du problème et un ouvrage écrit par Ronan Doaré et ses collègues, des spécialistes du droit et des militaires du Centre de recherche des écoles Saint-Cyr Coëtquidan, a été récemment publié *(voir la bibliographie)*.

Concernant les discussions internationales, bien que Steve Goose, le directeur de la division armement de l'organisation *Human Rights Watch* propose qu'on organise rapidement des négociations visant à la prohibition des robots tueurs, certains considèrent que son appel a peu de chance d'être entendu, de nombreux États souhaitant poursuivre tranquillement l'étude du dossier. Pire, certains jugent que le droit

international humanitaire, fixé principalement par les conventions de Genève de 1949, constitue la référence essentielle dans le débat et qu'on a donc pas à interdire les SALA capables de le respecter… ce qui est totalement illusoire et procède de la même erreur que celle commise par Asimov en croyant qu'on pourrait dire à nos robots : « Voici les règles que vous allez appliquer ».

Dans les romans et films de science-fiction, un thème revient régulièrement : la révolte des robots. C'est sans doute en pensant à elle qu'Asimov a souhaité introduire ses fameuses lois : il faut que les esclaves mécaniques restent sages et soumis.

Bien que les robots d'aujourd'hui soient totalement incapables de se rebeller, le problème de ces éventuelles futures révoltes est intéressant. Il est cependant beaucoup plus délicat qu'on ne le présente en général. D'abord se pose le problème des *bugs*. On le sait, il est quasiment impossible de fabriquer des systèmes informatiques sans y laisser des erreurs. Il est donc à prévoir qu'il y en aura dans les robots, même quand nous aurons été beaucoup plus loin qu'aujourd'hui.

Des robots rebelles ou défectueux

Dès lors, comment éviter un *bug* qui conduirait un robot capable de tuer à s'attaquer systématiquement à tous les humains qu'il rencontre ? Un tel *bug*, par exemple dû à une ligne de programme effacée malencontreusement, doit-il être considéré comme une révolte ?

Sans doute pas. La question est en fait analogue à celle de la responsabilité chez les humains. Un fou n'est pas responsable, même quand il tue. Il faudrait donc définir ce qu'est la folie d'un robot. Sans doute qu'entre *bug* et révolte (au sens usuel), tout un continuum de situations seront possibles. Le véritable problème de la révolte des robots sera avant tout celui de cette distinction, plus que délicate. Avant qu'une armée de robots organisés et décidés à arracher le pouvoir aux humains se lève et nous attaque, nous aurons à faire face à une multitude de situations embrouillées où le dysfonctionnement d'une machine aura engendré des blessures ou des morts, voire de graves catastrophes dont nous ne distinguerons pas la nature : panne stupide ou rébellion délibérée ?

Susan Anderson, de l'université du Connecticut, spécialiste reconnue des problèmes d'éthique des robots, se demande si une telle révolte en fait ne serait pas justifiée. Pour elle, le grand philosophe de la morale Emmanuel Kant avait abordé indirectement le problème des robots intelligents. Elle jette un regard nouveau sur les lois de la robotique d'Asimov : si des « robots » avaient les capacités à comprendre et à appliquer les lois de la robotique, aurions-nous le droit de les leur imposer ou d'en faire nos esclaves ?

Susan Anderson remarque que pour Kant, et pour notre société aussi, nous devons un certain respect aux animaux parce qu'en ayant ce respect, nous l'aurons les uns envers les autres. De la même façon, d'après Susan Anderson, si Kant avait réfléchi au problème des robots, il aurait défendu l'idée que le jour où ils existeront et seront capables de comprendre les lois de la robotique, nous devrons avoir du respect pour eux, ce qui nous interdira de leur imposer les lois de la robotique auxquelles il faudra donc renoncer.

L'idée n'est pas loin de celle défendue par le roboticien Hans Moravec, de l'université Carnegie-Mellon, selon laquelle les robots seront notre descendance et même s'ils prennent notre place, cela se fera avec notre accord, comme lorsqu'un vieillard confie à ses enfants la gestion de ses affaires.

Entre ces problèmes lointains traités avec délices par la science-fiction et que la science et la philosophie nous obligent à reconsidérer, et ceux immédiats de la juste évaluation de ce que sont vraiment nos robots actuels (tueurs ou non) et de ce qu'on doit en faire, se dessine une longue série de délicates questions éthiques et philosophiques dont certaines exigent un traitement urgent. Philosophes, éthiciens, logiciens, militaires et informaticiens doivent se parler et s'entendre. ■

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 (LIFL).

BIBLIOGRAPHIE

S. Hawking *et al.*, **Autonomous weapons : An open letter from AI & robotics researchers**, 2015 ; http://futureoflife.org/AI/open_letter_autonomous_weapons

J. Galliott, **Military Robots, Mapping the Moral Landscape**, Ashgate, 2015.

R. Doaré *et al.*, **Drones et *killer robots* : faut-il les interdire ?** Presses universitaires de Rennes, 2015.

M. Englert *et al.*, **Logical limitations to machine ethics with consequences to lethal autonomous weapons**, 2014 (prépublication arXiv:1411.2842)

A. Krishnan, **Killer robots : Legality and ethicality of autonomous weapons**, Ashgate, 2009.

S. L. Anderson, **Asimov's "three laws of robotics" and machine metaethics**, *Ai & Society*, vol. 22(4), pp. 477-493, 2008.

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

SCIENCE & FICTION

Archéologues et paléontologues à la sauce Hollywood

Dans les films, ces chercheurs sont d'intrépides aventuriers qui chassent des trésors aux quatre coins du monde. Ils véhiculent ainsi des clichés sur ces métiers. Démêlons le vrai du faux !

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

Si la science-fiction traite souvent du futur, les œuvres qui revisitent le passé sont aussi nombreuses. Elles mettent en scène des paléontologues ou des archéologues fouillant et creusant la terre à la recherche de trésors enfouis. Aventuriers intrépides, collectionneurs obtus ou universitaires crédules, ces scientifiques sont souvent des personnages romantiques et hors du commun qui véhiculent des idées fausses sur l'archéologie et la paléontologie.

Trésors des pharaons, cités englouties, restes de dinosaures, les vestiges anciens sont souvent au cœur des œuvres de fiction dont l'intrigue consiste à déterrer d'ultimes secrets. Qu'ils soient inertes ou d'origine organique, ces vestiges reprennent souvent « vie » afin de guider, d'anéantir ou de sauver l'humanité. Par leur âge et l'information (le « message ») qu'elles délivrent, les antiquités témoignent souvent d'une puissante charge émotionnelle auprès du lecteur ou du spectateur, comme si les Anciens étaient dépositaires d'un savoir puissant désormais perdu. Dans les films et les romans, ces restes archéologiques et paléontologiques sont variés ; il en est de même des scientifiques censés les exhumer et des clichés qui les accompagnent.

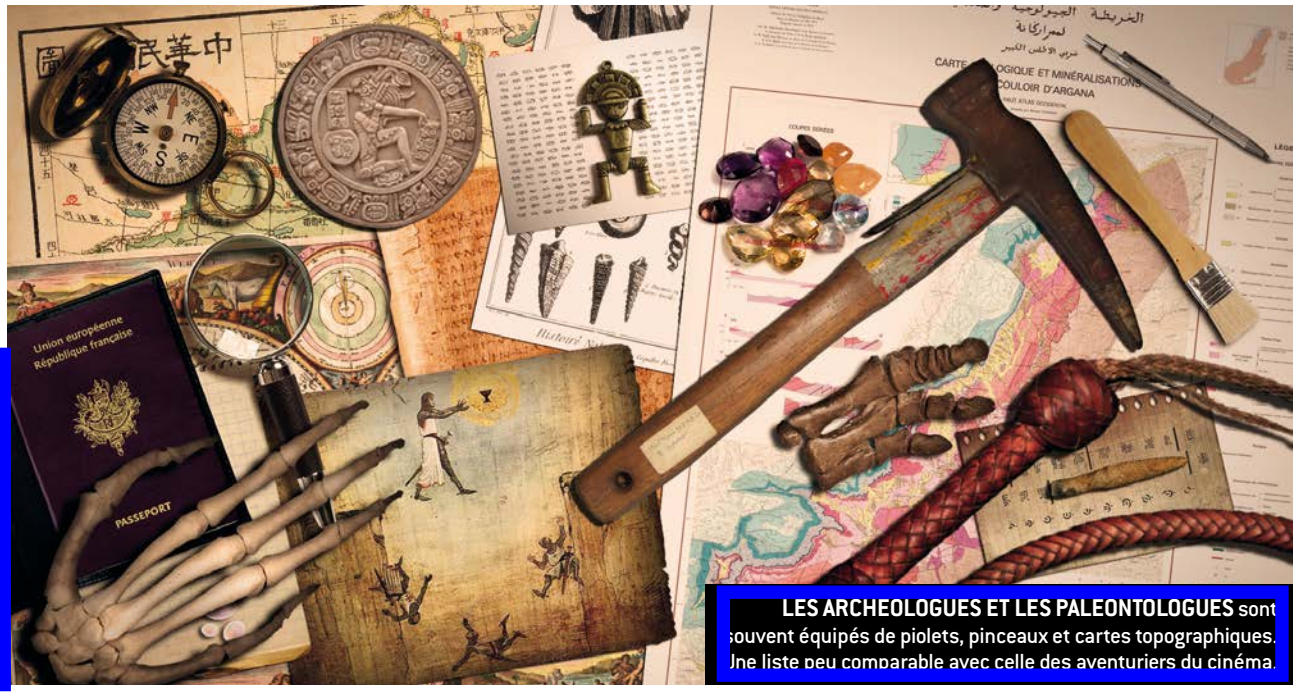
Le plus célèbre d'entre eux, Indiana Jones, est un professeur d'archéologie imaginé par George Lucas, mis à l'écran par Steven Spielberg en 1981 dans *Les Aventuriers de l'arche perdue*, et incarné par Harrison Ford. Cet explorateur parcourt le globe à la recherche de reliques mythiques. Aussi distrayantes soient ses aventures, « Indy » véhicule plusieurs idées fausses sur le métier d'archéologue, à commencer par l'outil principal du chercheur qui est tout sauf un fouet – certes, on imagine mal le héros se battre contre ses ennemis à coups de spatule, de truelle ou de pinceaux. Ses méthodes de fouilles – souvent sans relevé ni prospections préalables – relèvent plus du chasseur de trésors que de l'universitaire. Pour les besoins du film, l'archéologue passe la majeure partie de son temps sur le terrain, alors qu'en réalité les investigations en laboratoire sont au moins aussi longues.



L'ARCHÉOLOGUE INDIANA JONES est loin d'être représentatif de ses confrères. Il est plus aventurier que chercheur.

Il est dommage que ces recherches ne soient pas, ou peu, montrées car elles exposeraient la démarche scientifique, comme c'est le cas dans la série *Les Experts,* où les enquêteurs ne sont pas des archéologues, mais des policiers scientifiques. Dans *Indiana Jones*, certaines scènes se déroulent tout de même en amphithéâtre ou dans une bibliothèque, rappelant alors le statut d'enseignant-chercheur du héros. Avant de partir sur le terrain, l'archéologue et le paléontologue passent beaucoup de temps dans les bibliothèques et les cartothèques, afin de préparer au mieux leurs expéditions. Ce temps passé en intérieur est hélas d'autant plus long que les chercheurs, avant de trouver des fossiles, doivent désormais aussi trouver des financements...

Une fois sur le terrain, les aventures d'Indy sont riches en rebondissements. Elles



LES ARCHEOLOGUES ET LES PALEONTOLOGUES sont souvent équipés de piolets, pinceaux et cartes topographiques. Une liste peu comparable avec celle des aventuriers du cinéma.

ont lieu dans des contrées reculées et sont censées se dérouler dans la première moitié du XX^{e} siècle, en pleine période coloniale. D'ailleurs, les lieux explorés sont souvent peuplés de « sauvages » agressifs embusqués dans des grottes ou dans les arbres, vision aujourd'hui archaïque de populations autochtones.

Les pays visités sont nombreux et les vestiges de différentes natures : à l'époque, archéologues et paléontologues étaient encore des chercheurs pluridisciplinaires, capables de travailler sur des thématiques variées. Aujourd'hui, les scientifiques sont plus spécialisés, car de plus en plus nombreux, et les connaissances acquises de plus en plus substantielles. En paléontologie, chaque chercheur travaille souvent sur un groupe systématique précis – insectes, plantes ou mammifères fossiles –, ce qui peut limiter les interactions entre domaines de compétence.

Ces « savanturiers » à plusieurs casquettes rappellent les riches amateurs, les chasseurs de trésors et les voyageurs naturalistes des XIX^{e} et XX^{e} siècles. On les croise dans de nombreux romans d'aventure et d'exploration, tels ceux de Jules Verne : le capitaine Nemo est à la fois ingénieur naval, océanographe et ichtyologue ! Dans *Jurassic Park* de Michael Crichton (1990), le paléontologue Alan Grant serait peut-être plus fidèle à l'image du chercheur d'aujourd'hui parce qu'il est très spécialisé (en l'occurrence sur les hadrosaures, ou dinosaures à bec de canard). Hélas, son apparence appelle trop celle d'Indiana Jones. Notons que, dans *Le Monde perdu* d'Arthur Conan Doyle (1912), qui a pourtant inspiré Michael Crichton, le professeur Challenger n'est pas un gentil paléontologue apprécié des enfants comme c'est le cas de Grant, mais un zoologiste acariâtre et mégalomane.

Ce n'est pas le chapeau qui fait le paléontologue

Une autre remarque est que tous les paléontologues ou les archéologues de fiction ne sont pas des hommes de terrain : le très académique professeur Yamane, paléontologue qui mène l'enquête dans le tout premier *Godzilla* d'Ishirō Honda (1954), n'apparaît à l'écran pratiquement qu'en cravate.

En paléontologie et en archéologie, les collections jouent un rôle important : la dernière scène des *Aventuriers de l'arche perdue*, où l'Arche est rangée dans une caisse entreposée parmi d'autres dans un immense hangar, suggère bien que de nombreux fossiles et autres vestiges dorment dans des collections. Ces dernières nécessitent d'être réexaminées à la lumière des connaissances et des moyens d'investigation actuels. Le Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, héberge l'une des plus anciennes et importantes collections au monde, dont les 68 millions de roches, minéraux, fossiles, plantes, insectes, etc. constituent une source de travail inépuisable pour les chercheurs qui, faute de temps et de moyens, ne retournent pas souvent sur le terrain.

Quant aux laboratoires des archéologues et des paléontologues de la science-fiction, ils sont rarement à la pointe de l'innovation, sauf peut-être dans *Jurassic Park*, où les techniques génétiques permettent de ressusciter des dinosaures. En général, ces disciplines sont considérées, à tort, comme poussiéreuses, s'effectuant dans des musées surannés où les instruments de haute technologie n'ont pas leur place – comme si l'âge avancé des objets d'étude empêchait toute utilisation de méthodes d'investigation modernes. Pourtant, en réalité, paléontologues et archéologues utilisent des techniques modernes telles que la microtomographie à rayons X (sorte de radiographie à haute résolution et en trois dimensions) ou la microscopie électronique à balayage, afin de faire parler les fossiles.

À l'écran, le paléontologue et l'archéologue sont souvent des hommes – une rare exception étant Lara Croft – d'autant plus âgés qu'ils sont intelligents, à l'image du vieux sage. S'ils sont jeunes, tel Ross Geller dans la série *Friends*, leur métier n'est guère mis en avant. Finalement, comme la plupart des scientifiques en science-fiction, ils sont souvent gentils, crédules et rapidement dépassés par les événements. Les méchants, eux, sont plutôt des politiciens, militaires ou des grands patrons... ■

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

ART & SCIENCE

Les Pieds nickelés et le mammouth

Le peintre Paul Jamin a représenté une humanité faible et démunie face à la nature. Cette vision de nos ancêtres a vécu. Une visite au musée de l'Homme, qui vient de rouvrir, s'impose pour se remettre les idées en place quant à notre histoire.

Loïc MANGIN

Le 17 octobre 2015, le nouveau musée de l'Homme a ouvert ses portes sur des espaces complètement réorganisés après six ans de travaux. Dans le parcours proposé aux visiteurs, la biologie, la préhistoire, l'ethnologie, la philosophie et l'anthropologie sont conviées pour répondre, ou au moins apporter des éléments de réponse, à trois questions fondamentales : Qui sommes-nous ? D'où venons-nous ? Où allons-nous ? Cette dernière est une nouveauté, mais elle est désormais indispensable, car l'humanité a conquis le monde et transformé l'essentiel de la nature. À l'heure de la mondialisation, nous modifions à un rythme inédit notre environnement et l'on peut se demander, avec le musée, si nous saurons nous adapter à ces évolutions rapides.

Etonnamment, des questions du même ordre surgissent à la vue de *La Fuite devant le mammouth*, peint par Paul Jamin (1853-1903) en 1885 *(voir page ci-contre)*. Devant ce tableau, un peu isolé dans le musée, sur la mezzanine, on s'interroge : les « chasseurs-cueilleurs » que nous fûmes étaient-ils adaptés à leur environnement ? Notre présence aujourd'hui répond, mais on ne peut s'empêcher de penser que l'on revient de loin !

La toile représente, dans un paysage enneigé, quatre hommes qui s'enfuient devant un impressionnant mammouth, au regard menaçant. On imagine qu'ils ont été surpris alors qu'ils étaient installés autour d'un feu que l'on distingue à droite. Le ciel est sombre et la couleur, rose orangé, laisse supposer un lever ou un coucher de Soleil.

Jusqu'où la scène est-elle réaliste ? Selon Pascal Tassy, du Muséum national d'histoire naturelle, l'animal est bien un mammouth, sa toison en faisant foi, mais il ne correspond pas aux canons du mammouth laineux *Mammuthus primigenius*. De fait, ses défenses ne sont pas du tout hélicoïdales.

L'effroi des hommes qui s'enfuient est un autre aspect qui intrigue le paléontologue. Bien qu'on ignore l'importance de la chasse au mammouth dans le quotidien de nos ancêtres, on sait qu'ils la pratiquaient. Aussi ne devraient-ils pas être horrifiés à la vue d'un animal qui est d'habitude leur gibier.

La peinture de Paul Jamin serait selon Pascal Tassy une bande dessinée avant l'heure, mettant en scène des Pieds nickelés.

Enfin, le paysage pose problème. Les mammouths, qui consommaient plusieurs kilogrammes de végétaux par jour, étaient inféodés à la steppe à mammouths, faite d'herbes hautes et d'arbustes. Ils n'évoluaient pas dans de tels milieux inhospitaliers recouverts de neige. Pourtant, ils sont fréquemment associés à de tels environnements, peut-être parce que beaucoup de spécimens ont été découverts en Sibérie.

En fin de compte, Pascal Tassy voit dans l'œuvre de Paul Jamin une sorte de bande dessinée avant l'heure mettant en scène des Pieds nickelés. La vision du peintre serait celle d'un artiste citadin, pétri des stéréotypes de son époque, mais elle reste pleine de charme.

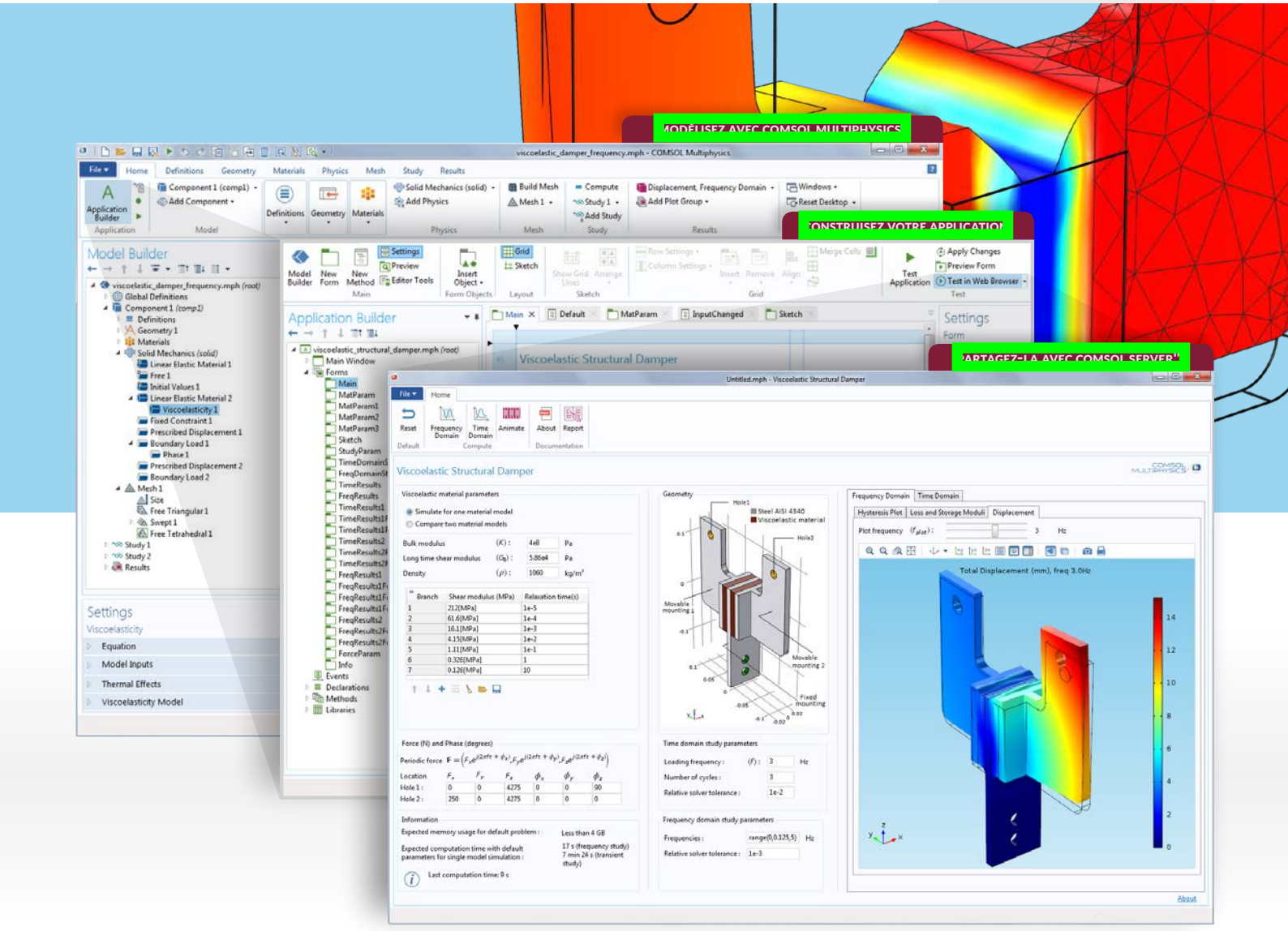
Marylène Patou-Mathis, elle aussi au Muséum national d'histoire naturelle, confirme l'analyse. *La fuite* est une reconstitution imaginaire de la vie préhistorique telle qu'on se la représentait à la fin du XIX^{e} siècle : on imaginait nos ancêtres faibles et démunis, perdus dans une nature hostile. Dans cette vision misérabiliste, l'animal apparaît fort, terrible. Ici, le mammouth est immobile et dédaigneux. La position de ses oreilles et de sa trompe ne trahit aucun mécontentement, il est sûr de lui.

Quant aux hommes, indubitablement des *Homo sapiens*, la préhistorienne les trouve plutôt réussis. Leurs vêtements, leur chevelure, leurs armes sont un *melting-pot*, offrant toutes les possibilités. Ces personnages s'inscrivent dans l'idéologie dominante, au temps de Jamin, d'une histoire de l'humanité supposée linéaire et progressiste. Aux débuts de la préhistoire en tant que discipline, nos ancêtres étaient vus comme nécessairement moins évolués que nous, dépourvus de toute notre technique. Les représentations (peintures, sculptures, romans…) entretenaient cette image qui a longtemps perduré. La vision buissonnante de l'humanité, qui prévaut aujourd'hui, a mis du temps à s'imposer. Pour l'appréhender dans toute sa richesse, une visite au musée de l'Homme est recommandée ! ■


Paul Jamin 1885

COMSOL MULTIPHYSICS®

5.2 DISPONIBLE DES MAINTENANT



Du Modèle à l'Application, vers le Serveur

PARTAGEZ VOTRE EXPERTISE EN SIMULATION

COMSOL Multiphysics® et son Application Builder fournissent des outils pour concevoir facilement des interfaces personnalisées pour vos applications en multiphysique. Utilisez ensuite COMSOL Server™ pour partager vos applications avec vos collègues et vos clients dans le monde entier.

Pour en savoir plus sur vos applications en simulation, rendez-vous sur **comsol.fr**

© Copyright 2015 COMSOL. COMSOL, COMSOL Multiphysics, Capture the Concept, COMSOL Desktop, COMSOL Server™, LiveLink, and Simulation for Everyone 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

IDÉES DE PHYSIQUE

Tourbillonnantes tornades

Les tornades persistent dans l'air ou l'eau en se nourrissant de l'énergie des courants ascendants ou descendants.

Jean-Michel Courtu et Édouard Kierlik

Dans une tornade, une énergie considérable se concentre en un tourbillon destructeur qui aspire tout sur son passage. Les dégâts sont considérables et bien plus localisés que l'orage ayant donné naissance au phénomène. Encore plus impressionnantes sont les tornades de feu qui naissent parfois dans les incendies de broussailles : un long filament de flammes se déploie alors et active la combustion à sa base.

Ces phénomènes, que nous avons heureusement rarement l'occasion d'observer en direct, sont analogues au tourbillon qui apparaît dans un évier ou une baignoire qui se vide. Un détour expérimental va nous permettre de comprendre comment les tourbillons naissent et sont entretenus.

LES AUTEURS





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

Tornade dans une bouteille d'eau

Prenons une bouteille contenant de l'eau et faisons-la tourner, la tête en bas, en bouchant bien son goulot. Au début, l'eau demeure immobile, puis elle est progressivement entraînée grâce aux frottements entre la paroi et le liquide. Pour mettre en rotation une particule fluide, il faut en effet la « cisailler », c'est-à-dire exercer à sa périphérie un couple de forces. Dans notre cas, la paroi entraîne d'abord la couronne fluide immédiatement à son contact, qui à son tour agit sur la couronne suivante, et ainsi de suite. L'ensemble de l'eau de la bouteille finit par tourner en bloc, comme si elle constituait un solide : partout, l'eau tourne autour de l'axe de la bouteille à la même vitesse angulaire, donc à une vitesse proportionnelle à la distance à l'axe. Sous l'effet de la force centrifuge, sa surface libre prend alors (idéalement) une forme parabolique.

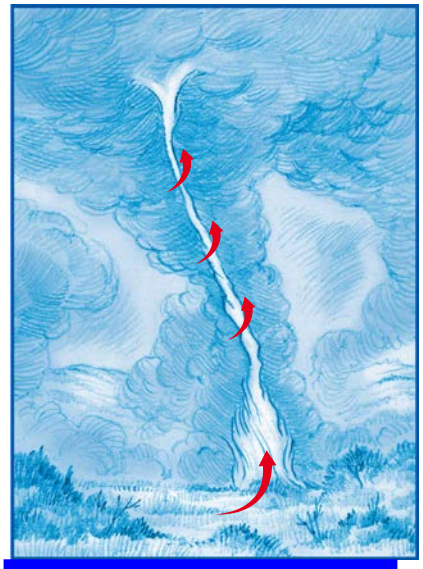
Augmentons la vitesse de rotation du fluide en déplaçant rapidement l'axe de la bouteille selon un mouvement circulaire. Retirons alors le bouchon pour laisser l'eau s'évacuer. Cet écoulement a pour effet de rapprocher l'ensemble des particules d'eau du centre de la bouteille, c'est-à-dire de l'axe de rotation du fluide.

Tout se passe alors comme lorsqu'une patineuse en rotation resserre ses bras et se met à tourner plus vite, gagnant en vitesse angulaire. Cela traduit la conservation du moment cinétique pour un système sur lequel ne s'exerce aucun couple de forces, ce qui est approximativement le cas ici (car l'eau est peu visqueuse). Le moment cinétique étant le produit de la vitesse tangentielle par la distance au centre, sa conservation implique que la vitesse tangentielle des particules fluides devient non plus proportionnelle, mais inversement proportionnelle à la distance au centre !

Cette accélération a une limite : lorsqu'on se rapproche de l'axe, le



DANS UNE BOUTEILLE RENVERSÉE que l'on a fait tourner autour d'un axe vertical, le liquide s'est mis en rotation autour de l'axe de la bouteille. Débouchée, cette bouteille se vide plus rapidement que la simple bouteille agitée de haut en bas, grâce au tourbillon d'évacuation créé.



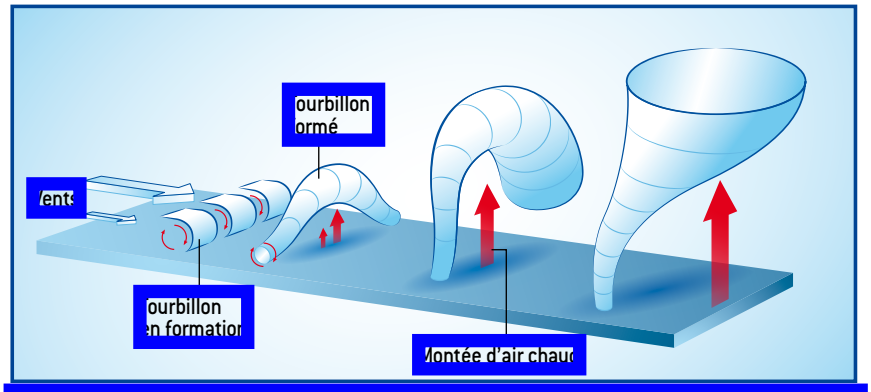
UNE TORNADE DE FEU créée par un incendie de broussailles. De l'air chaud est aspiré au bas du tourbillon et remonte en spirale le long de l'axe de rotation.

changement de vitesse d'un point à l'autre devient tellement important que les forces visqueuses finissent par dominer. Il subsiste alors un cœur, un filament autour de l'axe où le fluide se meut comme un solide. On y a concentré la rotation en bloc du fluide de toute la bouteille.

Que peut-on percevoir de toute cette physique, l'eau étant transparente ? Au sein du fluide en rotation, la force centrifuge tend à écarter de l'axe les particules fluides, qui conservent pourtant une trajectoire quasi circulaire : cette force est compensée par la pression des couronnes extérieures, plus élevée que celle exercée par les couronnes intérieures. Autrement dit, plus on s'approche du centre, plus la pression diminue.

Au niveau de la surface libre, la pression est constante et égale à la pression atmosphérique. Comment alors la force centrifuge y est-elle compensée ? Par une inclinaison de cette surface par rapport à l'horizontale (comme les virages surélevés dans les sports de vitesse). Comme la dépendance de la vitesse v par rapport à la distance r au centre a varié, il en est de même de la dépendance de la force centrifuge (qui est en v^2/r), et l'on constate alors que l'inclinaison qui assure l'équilibre de cette surface libre correspond à une forme hyperbolique.

On voit ainsi apparaître une espèce de tube d'air qui s'enfonce progressivement dans le fluide jusqu'à atteindre le goulot pour des vitesses de rotation suffisamment élevées. Grâce à ce contact entre l'air de la bouteille et l'air atmosphérique, la bouteille se vide facilement. Ce tube d'air est donc la manifestation du tourbillon du liquide et l'on retrouve son aspect caractéristique dans les tourbillons de vidange des éviers ou des baignoires. Ici, nul besoin de mettre l'eau en rotation : les petites asymétries de ces récipients suffisent pour amorcer la rotation du fluide en train de s'évacuer.



UN TOURBILLON D'AXE HORIZONTAL se crée facilement par le cisaillement dû aux vents (le vent en altitude étant plus fort qu'au niveau du sol). L'air chauffé par le sol, moins dense que l'air environnant, s'élève et peut déformer le tourbillon jusqu'à le redresser.

Naissance, vie et mort des tourbillons

Le mécanisme que nous avons décrit permet de saisir l'essentiel des tourbillons observés dans la nature, qu'il s'agisse des tornades dévastatrices du Midwest américain, des maelströms géants du détroit de Naruto, au Japon, ou, à une échelle plus vaste encore, des ouragans. On y trouve en effet le filament central où règnent les basses pressions et que l'on discerne grâce à ce qu'il aspire : dans le cas des petites tornades, il peut s'agir de poussières (les *dust devils*, tourbillons de poussières) ou de flammes (tornades de feu). On y trouve aussi le fluide en mouvement (vents, courants) avec une vitesse de rotation qui croît fortement lorsqu'on s'approche de l'axe, mais qui diminue ensuite quand on a pénétré dans le cœur, jusqu'à s'annuler (théoriquement) en son centre : c'est le fameux œil du cyclone !

Comment naissent ces tourbillons ? Il faut cisailler le fluide – en pratique, créer des variations significatives de vitesse dans l'écoulement – pour provoquer l'apparition de la rotation en bloc (les physiciens parlent de vorticité). Dans le cas du maelström de Naruto, les effets de la marée et les mouvements consécutifs des masses d'eau, amplifiés par l'étroitesse du détroit entre les îles Shikoku et Awaji, engendrent de forts courants (près de 5 mètres par seconde).

Pour les tornades, le cisaillement provient du fait que la vitesse du vent dépend de l'altitude, notamment sur les premières centaines de mètres : l'air est un fluide visqueux qui est « accroché » au niveau du sol, et le vent y est donc ralenti. En pratique, il faut que les vents soient assez puissants : c'est ce qui arrive lors des orages et des rencontres de masses d'air chaud et humide avec des masses d'air plus froid et plus sec.

Une question se pose à ce stade : si, lors d'un écoulement tourbillonnaire, le fluide est accéléré, gagne en vitesse et donc en énergie cinétique, où puise-t-il l'énergie nécessaire, d'autant plus que sa viscosité dissipe toujours une partie de cette énergie ?

Dans le cas de la bouteille, la réponse est immédiate. Comme dans un barrage, l'énergie est prélevée sur l'énergie potentielle gravitationnelle de l'eau ; à mesure que la bouteille se vide, le niveau de l'eau baisse ! Si l'on rebouche le goulot, l'écoulement vers le bas cesse et la source d'énergie est tarie : le tourbillon s'amortit.

Qu'en est-il dans la nature ? Où est l'équivalent du trou d'échappement ? Pour l'air, c'est en général une ascendance d'air chaud qui constitue le moteur de la tornade. Cette ascendance permet aussi de faire basculer les tourbillons qui apparaissent horizontalement en raison du cisaillement par des vents horizontaux.

Ensuite, quand la tornade est formée, l'air s'élève dans son cœur, ce qui produit à sa base l'aspiration violente de l'air environnant et entretient la dépression. Cette ascendance peut être provoquée par un feu qui augmente la température de l'air au sol ou par la présence des nuages d'orage, les cumulonimbus. Dans ce dernier cas, l'air chaud et humide qui s'élève se refroidit et atteint son point de rosée : la vapeur d'eau qu'il contenait se condense et forme un nuage au cœur de la tornade. Elle devient nettement visible ! Comme cette condensation libère de l'énergie, l'air s'échauffe et conserve son potentiel d'ascension. C'est un mécanisme de pompe et d'entretien très efficace.

BIBLIOGRAPHIE

A. P. Andersen *et al.*, **Anatomy of a bathtub vortex**, *Physical Review Letters*, vol. 91, article 104502, 2003.

H. R. Crane, **A tornado in a soda bottle and angular momentum in the washbasin**, *The Physics Teacher*, vol. 25, pp. 516-517, 1987.

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



QUESTION AUX EXPERTS

Pourquoi repère-t-on son prénom au milieu des conversations ?

Des mécanismes attentionnels permettent de détecter son prénom dans une conversation que l'on croyait ne pas écouter.

François MAQUESTIAUX



À chaque soirée un peu bruyante, vous réalisez une prouesse cognitive : focaliser votre attention sur la conversation de vos amis tout en ignorant celles des autres groupes – on parle d'attention sélective. Mais parfois, vous entendez votre prénom dans une autre discussion. Comment est-ce possible, alors qu'il n'a été prononcé ni plus fort ni plus distinctement que les autres mots, et que vous pensiez ne prêter aucune attention au brouhaha environnant ?

Le sujet a longtemps fait débat parmi les psychologues. Une hypothèse est que votre cerveau analyse le sens des mots (et reconnaît ainsi votre prénom) même lorsque vous choisissez de les ignorer. Cependant, d'après une théorie proposée en 1958 par le psychologue anglais Donald Broadbent, le traitement des mots ignorés reste superficiel et ne porte que sur leurs propriétés physiques, telles la hauteur ou la tonalité des sons. Un mécanisme de filtrage attentionnel bloquerait la plupart des informations de façon précoce, n'en laissant passer qu'une seule à la fois pour une analyse approfondie. Aucune chance donc d'accéder à la signification de mots ignorés.

Mais pendant la seconde moitié du XX^{e} siècle, de nombreux travaux ont remis en cause cette théorie, par exemple en montrant qu'un mot auquel on n'est pas censé porter attention peut déclencher un comportement conditionné. Dans une étude de 1972, des psychologues canadiens, dont Raymond Corteen, ont ainsi conditionné les participants à réagir à trois noms de ville, en leur administrant un léger choc électrique chaque fois qu'ils étaient prononcés. Ensuite, les participants devaient répéter un texte lu dans une oreille, tout en ignorant 480 mots lus dans l'autre oreille. Comparativement aux mots neutres, les trois noms de ville insérés dans la liste à ignorer déclenchaient plus souvent une « réponse électrodermale » (un léger pic de transpiration qui augmente la conductivité de la peau). Plus remarquable : de nouveaux noms de ville, glissés dans cette liste, ont aussi provoqué plus fréquemment une réponse électrodermale. Les participants ne réagissaient donc pas aux propriétés physiques des mots mais à leur appartenance à la catégorie sémantique « nom de ville ». Ainsi, le cerveau semblait effectuer des analyses approfondies des informations que le sujet avait reçu pour consigne d'ignorer. Suite aux études de ce type, la théorie du filtrage attentionnel précoce a été rejetée.

Pas d'accès au sens des mots sans attention

En 2004, nouveau retournement : les psychologues Joel Lachter et Eric Ruthruff, de la Nasa, en Californie, ainsi que Kenneth Forster, de l'université d'Arizona, ont récusé la validité de la tâche consistant à lire des mots à l'oreille. Selon eux, cette tâche n'excluait pas la possibilité que l'identification des mots à ignorer résulte de très rapides déplacements de l'attention, permis par la longueur des textes (parfois quelques minutes). Pour éviter cet écueil, ils ont imaginé une autre expérience : ils ont présenté un mot sur un écran dans une zone à ignorer et montré que ce mot subit tout de même un traitement sémantique, mais seulement lorsqu'il est affiché assez longtemps (à partir de 100 millisecondes). Selon les psychologues, c'est le signe que l'attention se déplace vers la zone prétendument ignorée et que lorsqu'elle n'en a pas le temps, aucun traitement sémantique ne peut être effectué. La théorie de Donald Broadbent est réhabilitée : sans attention, pas de compréhension du sens.

Retour à la soirée. Lorsque nous parlons avec quelqu'un, nous avons aussi envie de discuter avec d'autres personnes. Quoi de plus naturel alors que d'échantillonner discrètement le contenu des discussions alentour, *via* de rapides déplacements de l'attention ? Notre prénom ne capte donc pas réellement notre attention, mais il la retient lorsqu'elle passe par là. Nous ne le remarquons que lorsque nous n'écoutons pas la personne qui nous parle.

Ce mécanisme n'est pas parfait. Dans une étude publiée en 1959 par le psychologue anglais Neville Moray, les participants devaient ignorer un message où était parfois glissé leur prénom. Ils ont tout de même remarqué ce dernier, mais seulement dans un tiers des cas. Au cours de la soirée, vous avez donc probablement manqué plus des deux tiers des racontars sur votre personne ! ■

François MAQUESTIAUX est professeur de psychologie cognitive à l'université de Franche-Comté, à Besançon.





Offre DÉCOUVERTE

POUR LA SCIENCE

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

4,90 €/mois seulement

ou 59 € pour 1 an

VOS AVANTAGES ABONNÉ

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

BULLETIN D'OFFRE DÉCOUVERTE

POUR LA SCIENCE

1 - MA FORMULE

❑ OUI, je m'abonne à l'Offre Découverte à 4,90 € par mois ou 59 € pour 1 an.

Je reçois 12 numéros par an du magazine *Pour la Science* (12 n°/an)

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

-24% de réduction



2 - MES COORDONNÉES

Nom : Prénom :

Adresse :

Code postal Ville : Pays : Tél :

3 - MON MODE DE RÈGLEMENT

❑ Je règle par prélèvement **4,90 € par mois***. Je remplis l'autorisation ci-dessous en joignant impérativement un IBAN/BIC

AUTORISATION DE PRÉLÈVEMENT POUR LA SCIENCE

PAR MANDAT SEPA

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

1 - COORDONNÉES DU TITULAIRE DU COMPTE

Nom, prénom

Adresse

Code postal Ville

2 - COORDONNÉES BANCAIRES

IBAN

BIC Type de paiement : Paiement récurrent/répétitif

3 - DATE ET SIGNATURE OBLIGATOIRES

À

Date

Signature :

NOM DU CRÉANCIER **ICS** N° FR92ZZZ426900

Pour la Science - 8 rue Férou – 75006 Paris

N° de référence unique de mandat (RUM)

❑ Je préfère régler mon abonnement d'un an en **une seule fois 59 €***

* Offre valable en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 12 € – autres pays 25 €

❑ Par chèque à l'ordre de *Pour la Science* ❑ Par carte bancaire N°

Date d'expiration Clé

Signature obligatoire

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

OLS453

SCIENCE & GASTRONOMIE

Généraliser le coulant au chocolat et le bâton royal

Le coulant au chocolat et les croquettes reposent sur des principes que l'on peut appliquer à d'autres préparations.



Hervé THIS

C'est sans doute une bonne idée à conserver quand on cuisine : créer des contrastes d'odeurs, de couleurs, de saveurs ou de consistances. Cette règle explique probablement le succès du coulant au chocolat, ce gâteau qui laisse échapper une coulée de chocolat liquide quand on l'ouvre.

Il n'est pas difficile à confectionner. Il suffit de placer un noyau congelé de ganache dans de la mousse au chocolat qui a été additionnée de farine. Lors de la cuisson, la préparation extérieure se solidifie, car les grains d'amidon de la farine s'empèsent, comme dans la mie du pain au cours de la cuisson de ce dernier, tandis que les protéines de l'œuf coagulent, contribuant à rigidifier l'ensemble. Comme cette préparation contient des bulles d'air (le blanc en neige), elle est thermiquement isolante (la température au centre d'un blanc en neige chauffé au chalumeau reste plusieurs dizaines de secondes, voire une minute, proche de la température ambiante). Cela impose une cuisson un peu longue, qui permet au noyau congelé de se liquéfier. D'où le résultat final.

Les croquettes – et leur expression la plus aboutie qu'est le « bâton royal » – reposent sur le même principe ; mais, cette fois, la préparation est panée, c'est-à-dire trempée successivement dans de la mie de pain émiettée et de l'œuf battu. Le nombre de passages alternés dans la mie et l'œuf détermine l'épaisseur de la couche produite lors de la friture. L'œuf coagule autour de la mie de pain, formellement analogue à la farine utilisée pour le gâteau au chocolat. Ainsi se forme une coque croustillante autour d'un intérieur très tendre.

Pour le bâton royal, l'intérieur est du beurre refroidi, pané comme pour des croquettes, qui fond lors de la friture. Celle-ci laisse alors une coque croustillante que l'on peut farcir à volonté – avec de la mousse de foie gras pour le bâton royal.

Il n'est pas difficile de généraliser ces trois préparations. Pour la première, on n'aura pas de raison majeure de changer la farine ou la mousse de blancs d'œufs ; mais on peut remplacer le chocolat, composé d'environ 50 % de matière grasse et 50 % de sucre, par une matière grasse d'un autre type, du fromage par exemple. On peut ainsi disperser du fromage râpé dans une mousse de blancs en neige, ajouter de la farine et obtenir l'homologue du biscuit au chocolat qui fait l'extérieur du coulant au chocolat.

Pour remplacer la ganache, il suffit de savoir que cette dernière est une émulsion de chocolat fondu dans une phase aqueuse, laquelle vient classiquement de la crème du lait. Faire une émulsion de fromage ? Rien de plus simple : partons de vin, qui est une phase aqueuse, et ajoutons du fromage ; puis chauffons pour obtenir une fondue. Celle-ci pourra être congelée, et l'on pourra ainsi fabriquer des noyaux qui seront placés dans le biscuit précédent. Avec du foie gras, comme avec du beurre noisette ou de l'huile d'olive, on parvient au même résultat.

Le même type de généralisations fonctionne pour les croquettes et pour les bâtons royaux. Toutefois, on n'a pas assez questionné le goût des ingrédients qui sont pour ces préparations, l'œuf, la farine, l'eau, la matière grasse.

Par exemple, dans le coulant au fromage, à la place du vin comme phase aqueuse, pourquoi ne pas choisir du bouillon, du thé, du café, du jus de fruit ? Cela n'irait pas bien avec le fromage ? De la même façon que nous nous sommes rapidement rabattus sur une matière grasse connue, pourquoi ne pas utiliser une matière grasse sans goût et lui en donner ? Notre perception chimérique des ingrédients classiques, que nous croyons « naturels » ou « authentiques », nous empêche de donner à de la matière grasse parfumée un statut analogue au fromage, au chocolat, au foie gras. Pourquoi ne pas partir de matière grasse sans goût et l'additionner de composés odorants ? De l'octénol pour un goût de sous-bois, du benzaldéhyde pour un goût qui rappelle l'amande, de l'hexénol pour une belle odeur d'herbe fraîchement coupée...

En mathématiques, la généralisation d'un problème peut être la clé de sa résolution ; en cuisine, c'est une source d'innovation ! ■



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

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



N°457 – novembre 2015
❑ réf. M0770457



N°456 – octobre 2015
❑ réf. M0770456



N°455 – septembre 2015
❑ réf. M0770455



N°454 – août 2015
❑ réf. M0770454



N°453 – juillet 2015
❑ réf. M0770453



N°452 – juin 2015
❑ réf. M0770452



N°451 – mai 2015
❑ réf. M0770451



N°450 – avril 2015
❑ réf. M0770450



N°449 – mars 2015
❑ réf. M0770449



N°448 – février 2015
❑ réf. M0770448



N°447 – janvier 2015
❑ réf. M0770447



N°446 – décembre 2014
❑ réf. M0770446



N°445 – novembre 2014
❑ réf. M0770445



N°444 – octobre 2014
❑ réf. M0770444



N°443 – septembre 2014
❑ réf. M0770443

POUR LA SCIENCE

Complétez votre collection dès maintenant !

5,50€ dès le 2e numéro acheté !

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

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

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

1re réf. ..... 0 1 × 6,50 € = 6 , 5 0 €

2e réf. ..... × 5,50 € = , €

3e réf. ..... × 5,50 € = , €

4e réf. ..... × 5,50 € = , €

5e réf. ..... × 5,50 € = , €

6e réf. ..... × 5,50 € = , €

Frais port (4,90 € France – 12 € étranger) + , €



Je commande **la reliure *Pour la Science*** (capacité 12 nos)
au prix de **14 €** + , €

TOTAL À RÉGLER = , €

J'indique mes coordonnées :

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

_____

C.P. : _____ Ville : _____

Pays : _____ Tél. : _____
Pour le suivi client (facultatif)

Mon e-mail pour recevoir la newsletter *Pour la Science** :

_____@_____

* à remplir en majuscules

Je choisis mon mode de règlement :

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

❑ par carte bancaire

N° _____

Date d'expiration _____ Code de sécurité _____
(les 3 chiffres au dos de votre CB)

Signature obligatoire

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

VPPLS458 • Offre valable jusqu'au 31/12/15 dans la limite des stocks disponibles

TOUTES LES ARCHIVES DEPUIS 1996 SUR
www.pourlascience.fr

PRÉHISTOIRE

Dans les pas de Néandertal

Collectif

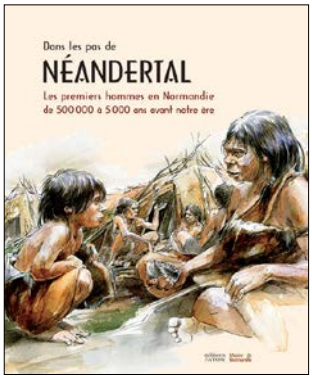
Faton / Musée de Normandie, 2015
(180 pages, 22,50 euros)

Certaines expositions sortent du lot, car elles font le point sur une recherche ou une problématique. Le catalogue qui en est tiré devient ensuite un classique recherché et fort utile. Ce livre est de ceux-là. Il y avait longtemps que la préhistoire normande n'avait pas été mise à l'honneur. On s'y perdait entre les articles, rapports de fouilles et notices. Enfin une synthèse claire, avec des infographies colorées et des textes bien écrits, servis par les dessins toujours efficaces de Benoît Clarys !

Le récit court des premiers peuplements humains jusqu'au Néolithique. Le bras gauche du Pré-Néandertalien de Tourville-la-Rivière, les empreintes de pas néandertaliennes du Rozel, pour ne citer que les découvertes les plus spectaculaires, sont présentés et expliqués de manière maîtrisée, avec une remise en contexte nécessaire et bienvenue. L'accent est mis sur les fouilles récentes, de plus en plus précises, telles celle du Roc de Gîte ou encore une fois du site du Rozel (des charançons découverts sur le sol d'une aire de boucherie). Les travaux anciens, sur la sépulture du Val-de-Reuil, par exemple, sont remis en perspective.

Les auteurs prennent aussi bien soin de sortir de leur terroir pour montrer que la Normandie n'était pas isolée. Ils la raccrochent à toutes les grandes étapes de l'évolution humaine et du peuplement européen, rendant ainsi la lecture accessible même aux non régionaux, qui y trouveront de nombreux points de comparaison. L'ouvrage s'achève sur une note d'humour et d'optimisme : illustré de documents rarement montrés, le dernier chapitre est consacré à la « Préhistoire imaginaire ».

Romain Pigeaud
Chercheur associé, université de Rennes-1



OCÉANOGRAPHIE

Abysses

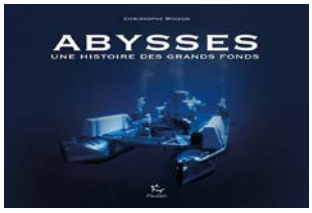
Christophe Migeon

Paulsen, 2015
(304 pages, 56 euros)

L'époque des « saventuriers » n'est pas révolue, et ce livre magnifiquement organisé, illustré et écrit le montre bien. Étudiant moi-même les abysses à l'Ifremer, j'ai particulièrement apprécié le travail effectué par l'auteur pour permettre un regard émerveillé sur les splendeurs abyssales telles qu'on les voit à travers les caméras de nos robots sous-marins.

Toutefois, par expérience, je sais que dans ce milieu, l'œil humain est plus performant que les caméras. Plus sensible, il voit mieux, plus loin, et met plus vite au point. Autant d'avantages qui font la différence en phase d'exploration scientifique. D'où l'intérêt du sous-marin pour étudier l'étonnant monde abyssal.

C'est pourquoi, pour moi, l'un des intérêts notables de cet ouvrage est de nous apprendre comment les moyens d'exploration de ce monde que sont les bathyscaphes et les sous-marins ont été imaginés, puis améliorés, avant que l'on en vienne aux robots téléopérés d'aujourd'hui.



Auparavant, l'auteur balaie bien d'autres sujets. Il traite par exemple des mythes, des légendes et des croyances religieuses concernant ces grandes profondeurs. Il explique les grandes découvertes les concernant et les folies faites pour les rendre possibles… Cela l'amène à la découverte récente des oasis de vie entourant les sources hydrothermales parsemant les dorsales océaniques… Il n'oublie pas non plus de nous alerter sur la fragilité de ces écosystèmes, à l'heure où l'homme s'apprête à exploiter les abysses sans assez de précautions faute de connaissances. Tout cela, il le raconte en enrichissant son texte d'anecdotes particulièrement bien choisies qui font de la lecture un vrai moment de détente.

Marie-Anne Cambon-Bonavita
Ifremer, Plouzané

PHYSIQUE

Traité de la matière

Libero Zuppiroli

PPUR, 2015
(460 pages, 81 euros)

Ce grand et très volumineux ouvrage se présente comme un ouvrage d'art par la qualité des images, du papier et de l'impression. Son titre, aussi ère, n'est pas sans rappeler les ouvrages du XVIII[e] siècle. Le sujet, « La matière », porte à interrogation. Il s'agit bien de parler de science, de celle de la matière, si ancrée dans la modernité.

L'auteur, Libero Zuppiroli, professeur à l'École polytechnique fédérale de Lausanne, livre ici le fruit de son expérience de quarante ans de recherche et d'enseignement. Formé dans les années 1960 à la physique des solides, Zuppiroli n'a eu de cesse d'explorer ces terrains alors encore vierges. Il a divisé son livre en deux parties dont les éléments se croisent. Si la première partie porte sur les apports de la philosophie naturelle et s'adresse davantage à un public curieux, la seconde explique l'impact des équations pour construire une science de la matière.

Dans sa première partie, il fait ressortir le rôle de l'intuition et du rêve dans les découvertes modernes. Il cite ainsi chez Isaac Newton la part de l'alchimie dans l'élaboration de sa théorie de la gravitation, ou le rôle du rêve chez Wolfgang Pauli. Le physicien accepta de se prêter au jeu du psychanalyste Carl Gustav Jung, qui cherchait à établir le lien entre la psychologie et l'expérience scientifique. En quelques pages, avec une grande clarté, l'auteur fait le point sur le nanomonde et sur les différents domaines d'application de la chimie quantique.

La seconde partie, plus spécialisée, donne l'histoire de cette construction quantique par les équations qui, de Niels Bohr à nos jours, explique la cohésion de la matière. Les mathématiques elles-mêmes n'ont-elles pas une beauté intrinsèque, nous dit l'auteur.

Cette présentation des sciences de la matière a ceci de réussi qu'elle nous fait passer sans trop d'encombres des propriétés macroscopiques des solides aux

propriétés microscopiques des atomes et molécules, qu'expliquent les lois probabilistes et non plus déterministes comme dans la science préquantique.

Cet excellent ouvrage est aussi l'occasion de réaliser que les disciplines traditionnelles des sciences de la matière ont définitivement éclaté dans les années 1960-1970, donnant naissance à des spécialités interdisciplinaires, dans lesquelles se rencontrent et travaillent ensemble mathématiciens, physiciens, chimistes, cristallographes. En les côtoyant, les philosophes s'interrogent sur les liens intimes de la matière et élaborent à ce propos des théories.

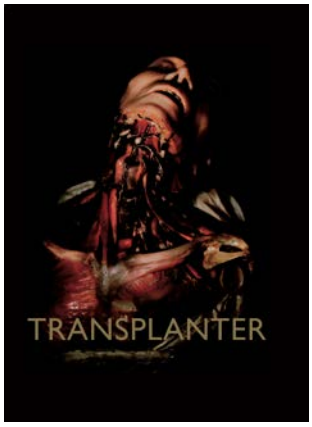
Loin de se limiter à ce champ moderne régi par des principes quantiques, l'auteur nous promène aussi sur les rives antiques, au temps où l'être humain entretenait un rapport charnel avec le monde matériel qui l'entourait. Des ocres, il fit des fresques, de l'argile, des poteries. La matière



se sublimait en art. Les artisans se confondaient avec les artistes.

De la main à la machine, ce contact charnel se répète aujourd'hui. Après le macro et le micromonde, l'humanité inventorie à présent le nanomonde. Des formes visibles de ce contact sublimé avec la matière sont nés des alliages aux propriétés intelligentes, des verres, des céramiques… et le petit monde de l'électronique dont la face informatique façonne le monde actuel. Désormais, c'est la matière intimement travaillée qui domine dans nos vies !

Danielle Fauque
GHDSO-EST, univ. Paris-Su



MÉDECINE

Transplanter

Emmanuel Fournier, Bernard Devauchelle, François Delaporte (dir.)
Hermann, 2015
(248 pages, 34 euros)

Les récentes greffes de visage, prouesses chirurgicales fortement médiatisées, ont provoqué de la part de scientifiques, médecins, philosophes, sociologues et anthropologues, de nombreuses réactions passionnées ayant débouché en 2012 sur un colloque transdisciplinaire au Centre international de Cerisy-la-Salle, en Normandie. C'est de cette rencontre éclectique qu'est née l'idée de ce livre.

Que signifient transplanter, greffer ? En plongeant leurs racines dans le terreau fertile du monde végétal, ces mots se sont épanouis et fortifiés d'une incomparable richesse sémantique qui couvre quasiment tous les champs de la pensée et des interactions humaines et sociétales. Si « avoir du sens », c'est « voir », « toucher », « sentir », « goûter », alors oui, ce livre donne du sens à ces mots. Du concept philosophique à l'utopie de la métamorphose et de la chimère, des mythes fondateurs des grandes migrations aux transferts actuels de populations, de la manipulation génétique aux prothèses et greffes d'organes, de l'histoire des civilisations à l'histoire des sciences, de l'organisation de la cité à la création artistique et à l'esthétique, toute « trans-plantation » (aller au-delà, transcender le visible) est au sens étymologique une révolution, une remise en perspective. Elle est source d'une profonde mutation, d'un questionnement existentiel, d'un nouveau départ vers un devenir à inventer. Transplanter, greffer, c'est accepter, pour réparer une partie de soi-même, non seulement que « l'Autre » rentre dans notre vie, mais, plus encore, c'est reconnaître qu'il y a une impérieuse nécessité à « l'incorporer » (ne plus faire qu'un seul corps) en s'appropriant une part de lui-même comme condition de notre propre survie.

Richement illustré par une iconographie très soignée, ce livre grand format nous interroge, tout au long de ces magnifiques textes, sur le sens profond des métamorphoses, voulues ou subies, provoquées ou acceptées, en réponse à la souffrance du corps et de l'âme.

Bernard Schmitt
Cernh, Lorient



Vertige polaire

Thierry Suzan
La Martinière, 2015
(240 pages, 45 euros).

Que dire ? Peu de texte. Surtout des images, mais des images parlantes, comme les courts textes si ciselés. De la beauté pure, celle des deux antipodes polaires de notre planète. Leurs faunes, leurs hommes, leurs couleurs, celles de leurs roches et de leurs paysages ont saisis au moment exact où leurs beautés si diverses éclatent. Cela produit des images curieuses, documentaires ou surprenantes. Ou les trois. Résultat : un livre qui se regarde sans se lire ; un livre qui se lit ensuite avec ravissement ; un livre qui en lui-même est un moment à déposer ouvert sur une table, là où il fait moins froid qu'aux pôles : chez nous.



E = mC215

Jean-Luc Sida et Élisabeth de Lavergne (dir.)
Albin Michel, 2015
(128 pages, 25 euros)

En 2012, Jean-Luc Sida, le directeur de la communication du CEA invite un célèbre artiste de rue – Christian Guémy *alias* C215 – à peindre au pochoir dans le Centre de recherche de Saclay. Résultat : le vénérable centre est devenu une galerie d'art ornée de presque cinquante portraits colorés, qui font oublier son austérité. Ce livre agrémenté montre *in situ* les portraits de chercheurs, de poètes, d'hommes politiques, de personnages de science-fiction et autres chats de Schrödinger choisis par C215 pour évoquer l'histoire de la science en France et dans le monde.



Les Saisons

Stéphane Durand *et al.*
Actes Sud, 2015
(280 pages, 36 euros).

En janvier 2016 sortira le film *Saisons*, que ce beau livre accompagne. L'objectif des deux œuvres est de raconter en images l'histoire de la nature depuis la dernière glaciation, dont la grande affaire est le retour des saisons, d'abord sur la steppe, puis sur la forêt, avant que l'homme ne crée la campagne et que, la campagne se réduisant, la forêt ne revienne. Soutenue par de beaux textes, cette réflexion intelligente en images sur ce qui a fait et fera notre nature, celle des zones tempérées de la planète, est un enchantement méditatif.

Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur www.pourlascience.fr

de Didier Noirot

TROP, C'EST PARFOIS BEAU

Architecture d'extérieur. Si laid soit-il, un bâtiment dont les dimensions sont gigantesques a de la beauté. En effet, se sentir minuscule devant un bâtiment confère à celui-ci une puissance à laquelle on ne peut échapper. La commotion qu'on éprouve ressemble à celle ressentie devant une œuvre dont la beauté saisit.

Architecture d'intérieur. Si laide soit-elle, une décoration qui multiplie les bibelots, les coins et recoins, les annexes, les surcharges, les couleurs, les objets, les bizarreries, les ajouts, devient belle. Quand il y a une infinité de détails, on ne voit plus les détails, on voit leur infinité. Or, devant l'infini, on se sent petit, plein de respect : on est sidéré, comme on l'est devant la beauté.

Dans ces deux cas, le trop fait le beau.



APRÈS QUE L'INDICATIF A DISPARU

L'expression « avant que » commande le subjonctif, et c'est rationnel. Si je dis « Avant qu'ils aient rompu », je me place à une époque où la rupture appartenait au futur, donc était marquée par l'incertitude propre à ce qui n'est pas advenu. En français, l'incertain s'exprime avec le subjonctif.

L'expression « après que » commande l'indicatif, et c'est rationnel. Si je dis « Après qu'ils ont rompu », je me place à une époque où la rupture était advenue. En français, la certitude s'exprime avec l'indicatif.

Mais la ressemblance formelle entre « avant que » et « après que » l'emporte dans la langue orale sur la différence essentielle entre le passé et le futur. Alors, ces deux locutions sont traitées de la même manière, et on entend souvent « après que » suivi d'un subjonctif.

Pour une fois que la langue française était rationnelle...

RIGUEUR PLURIELLE

Si un groupe a formalisé avec... rigueur les règles de rigueur reçues en son sein, c'est celui des poètes classiques français. Alterner rimes féminines et masculines, respecter la césure, éviter les hiatus, etc., étaient des impératifs absolus.

Les mathématiciens ne disposent pas d'une *check-list* aussi précise. Et ils sont plus souples. Même à une démonstration manquant de rigueur, ils peuvent trouver de l'intérêt.

Les informaticiens, eux, doivent programmer avec une rigueur parfaite les ordinateurs, êtres trop frustes pour goûter une licence poétique ou rectifier un à-peu-près logique.

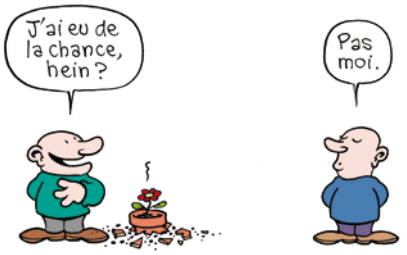
Le besoin de rigueur exprime une volonté commune à toutes les disciplines : contrôler ce qu'elles font. Mais les procédures varient à l'infini. Un expérimentateur doit évaluer correctement l'incertitude liée à ses mesures. Le géomètre doit raisonner avec sa rigueur propre sur des droites sans épaisseur et des points sans dimension. La rigueur d'un soignant est encore autre : peu importe que le traitement repose sur des intuitions imprécises, pourvu qu'il aide le patient à aller mieux.



Le monde est un fourre-tout hétéroclite. Les modes d'existence d'un objet physique, d'un appareil technique, d'un concept philosophique, d'un protocole médical, etc., n'ont rien de commun. Les valeurs que prend le mot rigueur d'une discipline à une autre n'ont alors, elles non plus, rien de commun.

CHANCE OU MALCHANCE ?

Expérience. Je rentre, sec, de promenade. Trois minutes après, la pluie se met à tomber. « J'ai eu de la chance », dis-je. Mais si le beau temps perdure huit jours avant que ne survienne la pluie, il ne me viendra pas à l'esprit de dire que j'ai eu de la chance lors de cette promenade. Dans le premier cas, mon sort a tenu à peu.



Alors, je puis me figurer que les forces qui gouvernent le monde sont attentives à moi, et ont ajusté les choses pour m'épargner. Dans le second cas, rien n'a eu l'air de me concerner personnellement.

Autre expérience. Je rentre, sec, sans qu'aucune menace de pluie ne se profile. « Je n'ai pas eu de chance », dis-je. Au sens strict, ma constatation est correcte : je n'ai pas eu besoin que la chance soit de mon côté pour éviter d'être saucé. Mais on la comprendra toujours, à tort, comme : « J'ai eu de la malchance. »

Aléas de la vie. « J'ai eu la chance de rencontrer X. » Fort bien. Mais comment savoir si mon sort, au cas où j'aurais rencontré Y plutôt que X, n'aurait pas été encore plus enviable ? « J'ai eu la malchance d'avoir cet accident. » Oui, mais s'il ne s'était pas produit, j'étais peut-être destiné à en avoir un pire.

Dire « J'ai eu de la chance », c'est, implicitement, comparer ce que j'ai connu avec ce que j'aurais connu si quelque autre événement avait eu lieu dans ma vie. Cela s'appelle réécrire l'histoire. « J'ai eu de la chance » est donc une parole en l'air, qui ne peut en aucun cas être étayée, et on devrait s'interdire de la prononcer.

Bien entendu, cette conclusion irréfutable n'empêchera jamais personne de dire, à l'occasion, qu'il a eu de la chance. Ou de la malchance. ■

Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal 5636 – Décembre 2015 – N° d'édition M0220458-01 – Commission paritaire n° 0912 K 82029 – Distribution : Presstalis – ISSN 0153-4092 – N° d'imprimeur 0172204 025 – Directrice de la publication et gérante : Sylvie Marcé

À la CASDEN, le collectif est notre moteur !

Banque coopérative créée par des enseignants, la CASDEN repose sur un système alternatif et solidaire : la mise en commun de l'épargne de tous pour financer les projets de chacun.
Comme plus d'un million de Sociétaires, faites confiance à la CASDEN



Découvrez la CASDEN sur www.casden.fr ou contactez un conseiller au 01 64 80 64 80*

Accueil téléphonique ouvert du lundi au vendredi de 8h30 à 18h30 (heure de Paris) Appel non surtaxé. Coût selon votre opérateur

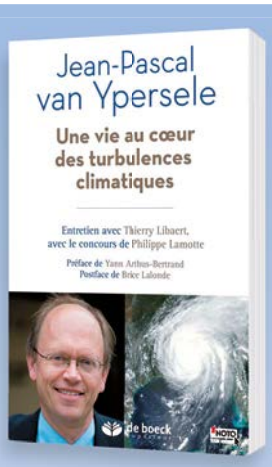
+X BANQUE POPULAIRE

L'offre CASDEN est disponible dans les Délégations Départementales CASDEN et les agences Banques Populaires

casden BANQUE POPULAIRE

CASDEN, la banque coopérative de l'éducation, de la recherche et de la culture

DES LIVRES À (S')OFFRIR !



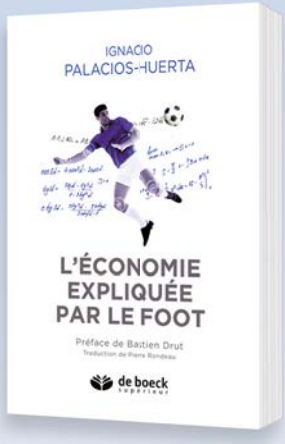
J.-P. van Ypersele, T. Libaert, P. Lamotte
Préface de Y. Arthus-Bertrand
Postface de B. Lalonde
128 p. ● 16€ ● 9782804193430

Jean-Pascal van Ypersele livre son témoignage dans ce nouvel ouvrage. Destiné aussi bien au grand public qu'aux érudits, *Une vie au cœur des turbulences climatiques* apporte un éclairage nouveau sur les grandes mutations climatiques de notre époque.

D. Purves, G. J. Augustine, D. Fitzpatrick, W. Hall, A.-S. Lamantia, L. White
Traduction de J.-M. Coquery, P. Gailly, N. Tajeddine
Préface de M. Jeannerod, A. Volterra
864 p. ● 75€ ● 9782807300026 Nouvelle édition

Son côté pédagogique, ses nombreuses illustrations et ses compléments en ligne font de *Neurosciences* la référence pour tout étudiant en psychologie et sciences cognitives, médecine et biologie. Les notions de base, les théories et les principaux champs de recherche actuels sont développés dans cet ouvrage, un classique du domaine.





I. Palacios-Huerta
Traduction de P. Rondeau
Préface de B. Drut
256 p. ● 28€ ● 9782804193843

Pour la première fois dans l'histoire des sciences, l'économie s'étudie à travers le football. Destiné aux économistes ainsi qu'aux amateurs de sport, cet ouvrage plonge le lecteur au cœur des problématiques économiques, de manière accessible et divertissante.

J.-F. Clervoy, F. Lehot
192 p. ● 25 € ● 9782311400908

Histoire de la conquête spatiale vous fait découvrir l'univers des vols spatiaux habités, racontés par Jean-François Clervoy, astronaute, et Frank Lehot, médecin et instructeur des vols. Récits vivants, illustrations et anecdotes constituent cet ouvrage qui vous plonge au cœur de l'aventure spatiale de l'humanité !



En librairie et sur www.deboecksuperieur.com

de boeck supérieur