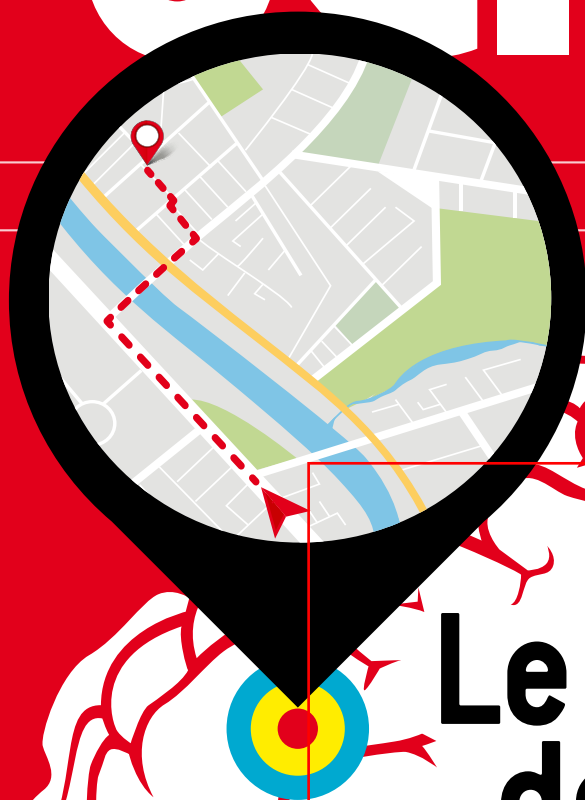


■ POUR LA

SCIENCE



Mai 2016 - n° 463

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

Le GPS de notre cerveau

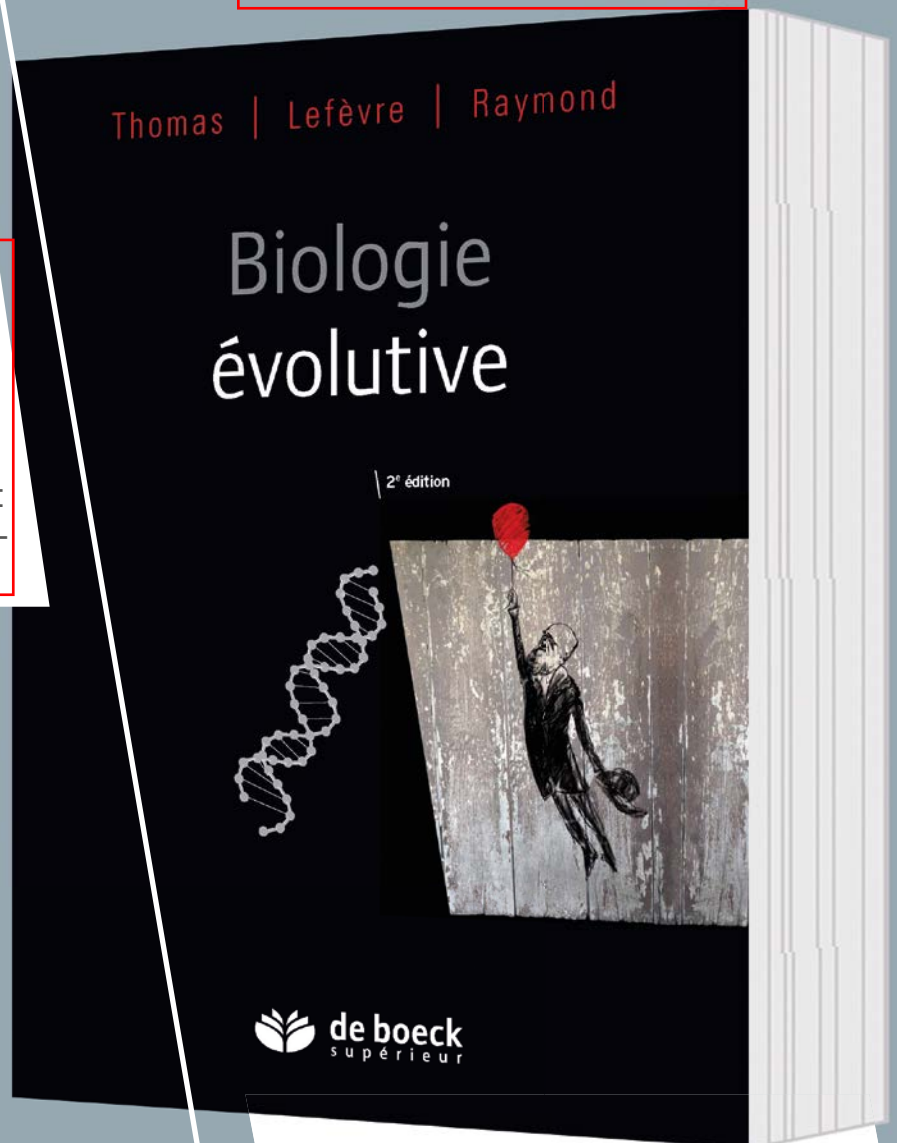
Les neurones de
l'orientation racontés
par leurs découvreurs



Biologie évolutive

2^e édition

Ce livre est une invitation à découvrir la biologie évolutive. Œuvre issue de la collaboration de nombreux chercheurs et enseignants, il reflète l'état des connaissances de la communauté scientifique en biologie évolutive et constitue le support idéal pour l'enseignement de la discipline.



Avril 2016 • 1000 pages

92 € • 97828073029

Sous la direction de :
Frédéric Thomas
Michel Raymond
Thierry Lefevre

Cette seconde édition aborde tous les grands thèmes de la biologie évolutive dans une version actualisée et enrichie de nouveaux chapitres. L'ouvrage, unique en langue française, présente ainsi un panorama étonnant du monde vivant et reste une œuvre à la pointe de la recherche dans ce domaine.

En librairie et sur www.deboecksuperieur.com

 **de boeck**
supérieur

■ 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, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy

Correction et assistance administrative : Anne-Rozenn Jouble

Marketing : Laurence Hay et Ophélie Maillet,

assistées de Marie Chaudy

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 :

Jean-François Baroiller, Nicolás Bernal, Maud Bruguère,

Sophie Félix, Évelyne Host-Platret, Capucine Jahan,

François Képès, Anne Masé, Christophe Pichon, Bruno Poucet

PUBLICITÉ France

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin

(jf.guillotin@pourlascience.fr)

Tél. : 01 55 42 84 28 ou 06 82 80 52 92

ABONNEMENTS

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

Courriel : pourlascience@abopress.fr

Téléphone : 03 67 07 98 17

Adresse postale : Service des abonnements - Pour la Science, 19 rue de l'Industrie, BP 90053, 67402 Illkirch Cedex

COMMANDES 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.

Tarifs d'abonnement 1 an - 12 numéros

France métropolitaine : 59 euros Europe : 71 euros

Reste du monde : 85,25 euros

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 traduc-

tion, d'adaptation et de représentation réservés

pour tous les pays. La marque et le nom com-

mmercial « 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 inter-

dit de reproduire intégralement ou partiellement

la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou

du Centre français de l'exploitation du droit de co-

pie (20 rue des Grands-Augustins - 75006 Paris).



Maurice Mashaal
rédacteur en chef

Où suis-je, où vais-je ?

Si l'on veille à les prendre au premier degré, ces questions semblent si élémentaires que nous ne nous les posons qu'exceptionnellement. D'ordinaire, nous savons d'emblée, à tout moment, où nous sommes et où nous allons : pas besoin de réfléchir pour savoir que nous nous trouvons dans la cuisine et que nous devons rejoindre la salle à manger, ni pour déterminer l'itinéraire correspondant !

La capacité à s'orienter dans l'espace est certes répandue chez les animaux et essentielle à leur survie, mais ses rouages n'ont, si l'on y réfléchit un peu, rien d'évident. Comment le cerveau d'un animal détermine-t-il sa position et le chemin qu'il doit parcourir ?

Les scientifiques n'ont commencé à obtenir des réponses substantielles à la question qu'assez récemment. Bien qu'elles soient encore incomplètes, ces découvertes sont suffisamment importantes et spectaculaires pour avoir été distinguées par le prix Nobel de physiologie-médecine en 2014.

Des neurones spécialisés qui cartographient l'espace, une découverte nobélisée

Deux des trois lauréats, les époux norvégiens May-Britt et Edvard Moser, nous expliquent dans ce numéro ce que l'on a appris du « GPS cérébral » des mammifères grâce à des expériences sur les rats. Ils nous révèlent notamment les remarquables profils d'activité de certains neurones clés, tels que les « cellules de lieu » et les « cellules de grille », qui cartographient littéralement l'espace (voir « Le GPS de notre cerveau », pages 26 à 34).

Le système cérébral de localisation et d'orientation a par ailleurs des liens étroits avec les circuits de la mémoire. D'où, probablement, sa vulnérabilité précoce dans la maladie d'Alzheimer. Hélas, cela ne nous aidera pas à comprendre une autre maladie trop répandue, où des individus déboussolés prennent des trajectoires mortifères tout en ayant la prétention de savoir où ils vont : l'extrémisme. ■

3 **Édito**

Actualités

- 6 Le génome réduit à sa plus simple expression
- 7 Comment Zika s'attaque aux neurones
- 8 Une nouvelle régularité dans la suite des nombres premiers
- 9 Vision ultrarapide chez les passereaux
- 9 Alzheimer : faire revenir des souvenirs



Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

- 14 **Point de vue**
Science et responsabilité : une réflexion collective s'impose
Léo Coutellec
- 16 **Entretien**
Apple et le FBI : « Un système de chiffrement muni d'une trappe serait catastrophique »
David Pointcheval
- 20 **Cabinet de curiosités sociologiques**
Les classiques à la lumière des données massives
Gérald Bronner
- 22 **Homo sapiens informaticus**
Quel est le prix de notre anonymat ?
Gilles Dowek
- 24 **Lu sur SciLogs.fr**
Le pivot copernicien
Richard Taillet

Ce numéro comporte un encart d'abonnement broché et un encart d'abonnement jeté en cahier intérieur sur la diffusion kiosque en France.
En couverture : © shutterstock.com/Alena Hovorkova

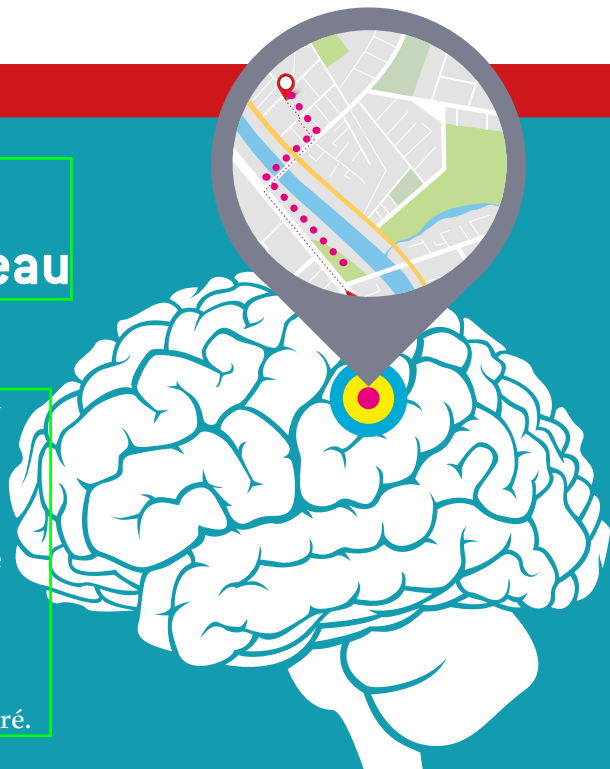
4 **Sommaire**

À LA UNE

26 NEUROSCIENCES Le GPS de notre cerveau

May-Britt Moser et Edvard Moser

Le sens de l'orientation n'est pas un mythe : notre cerveau est bien doté d'un système de localisation et de navigation hors pair. La découverte récente de ce GPS biologique a valu le prix Nobel aux époux Moser, qui nous décrivent ici ce système et son fonctionnement élaboré.



36 ASTROPHYSIQUE Les multiples visages de la matière noire

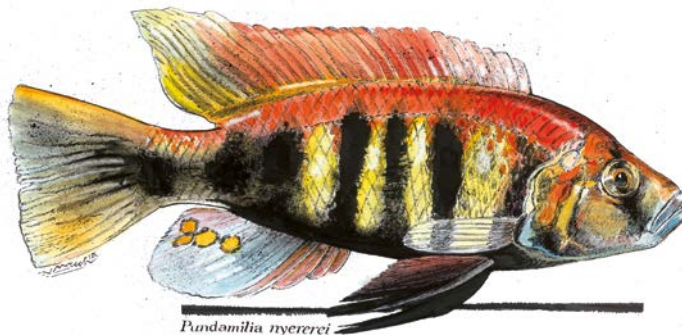
Bogdan Dobrescu et Don Lincoln

Pourquoi n'a-t-on toujours pas détecté la matière noire, censée être majoritaire dans l'Univers ? Parce qu'elle n'existe pas ? Ou parce qu'elle est bien plus complexe qu'on ne le pensait, comme le proposent de nouveaux modèles ?

44 ÉVOLUTION Cichlidés : les clés d'une spectaculaire évolution

Axel Meyer

Les poissons cichlidés comptent plus de 2500 espèces, dont beaucoup sont apparues en moins de 15 000 ans. Chez les vertébrés, il s'agit d'un record absolu, dont les ressorts sont tapis dans le génome.



52 MÉDECINE

Quelles pistes pour soigner la DMLA ?*Benjamin Wolff, Martine Mauget-Faïsse et José-Alain Sahel*

À partir de 65 ans, la vision centrale d'une personne sur cinq se dégrade progressivement à cause de cette maladie de la rétine liée à l'âge. Les traitements actuels sont limités voire inexistant pour la forme sèche de la maladie. Mais de nouvelles thérapies devraient bientôt changer la donne.



62 ARCHÉOLOGIE

L'Amazonie, une terre promise pour l'archéologie*Stéphen Rostain*

Sanctuaires de pierre, routes de 40 mètres de large, cités perchées sur d'imposants tertres de coquillages... De récentes fouilles révèlent le passé et la longue et riche histoire des Amazoniens, totalement méconnue jusqu'à ce jour.

70 HISTOIRE DES SCIENCES

Paul Helbronner, le métronome de l'inutile*Daniel Léon*

Entre 1903 et 1928, ce géodésien aujourd'hui oublié a gravi plus de sommets que quiconque dans les Alpes françaises. Avec une touchante obstination, il a mesuré le moindre recoin du massif... alors que de nouveaux instruments allaient bientôt rendre son travail obsolète. Restent ses magnifiques aquarelles et son immense collection de photographies.



Rendez-vous

78 Logique & calcul

Au pays des illuminés du nombre π
Jean-Paul Delahaye

La suite des décimales de π constitue un terrain de recherches et de jeux, ouvert à tous pour le meilleur... et pour le pire !

84 Science & fiction

L'imaginaire cristallisé*J.-Sébastien Steyer et Roland Lehoucq*

86 Art & science

Bienvenue en Floride !*Loïc Mangin*

89 Idées de physique

L'énergie du sel*Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik*

92 Question aux experts

D'où viennent les comètes ?*Alain Doressoundiram*

94 Science & gastronomie

Le beurre est bon, qu'il soit cru ou noisette*Hervé This*

96 À lire

98 Bloc-notes

Les chroniques de Didier Nordon

POUR LA SCIENCE .fr

Lettre d'information



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

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

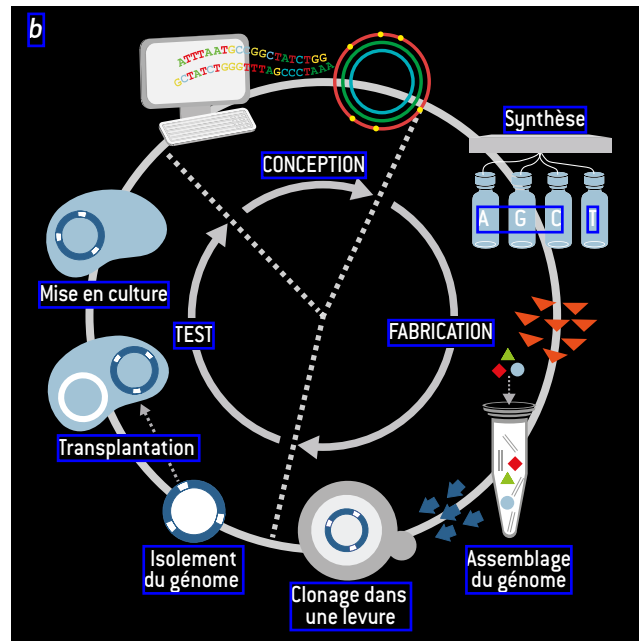
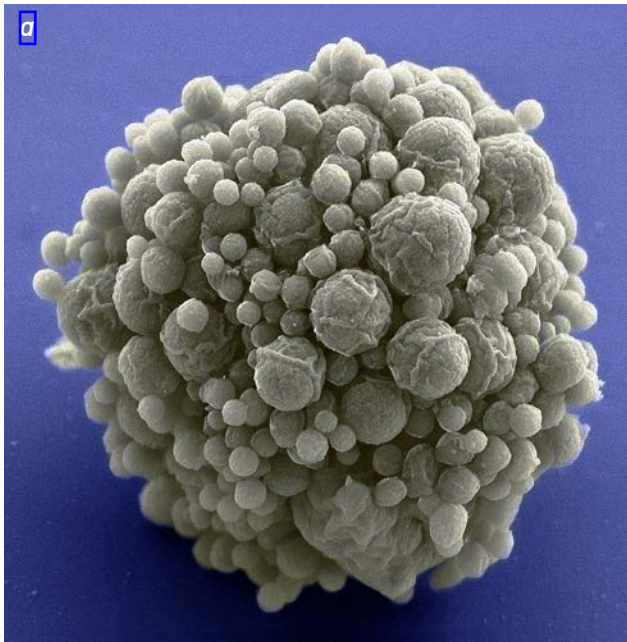


Recevez gratuitement la lettre d'information en inscrivant uniquement votre adresse mail sur www.pourlascience.fr

Actu

Le génome réduit à sa plus simple expression

En éliminant progressivement des gènes, une équipe de biologistes a produit une cellule viable avec un génome artificiel formé de 473 gènes seulement – dont un tiers ont une fonction inconnue !



Un amas de cellules artificielles au génome minimal *(a)* a été obtenu par un processus circulaire d'essais et d'erreurs *(b)*. Un génome est conçu à l'aide d'un ordinateur, puis assemblé à partir de nucléotides. Il est ensuite transplanté dans une cellule de bactérie dont on retire le génome d'origine. Une mise en culture permet de s'assurer que la cellule est viable et se réplique.

La nature a produit des gé-
nômes de toutes tailles. Par
exemple, celui du blé compte
plus de 120 000 gènes, celui de
l'homme environ 20 000, quelques
centaines ou milliers pour les bacté-
ries... D'où une question qui
interpelle les généticiens depuis
longtemps : combien de gènes
sont nécessaires pour produire
une cellule viable et capable de
se répliquer ? L'équipe de Craig
Venter, cofondateur de l'institut
qui porte son nom, à La Jolla en
Californie, répond en partie à cette
énigme. Elle a réalisé une telle
cellule avec seulement 473 gènes.

Ce résultat est une étape importante de la biologie de synthèse, domaine scientifique dont l'un des objectifs est de construire de nouveaux systèmes biologiques pour mieux comprendre

les mécanismes du vivant. Pour Craig Venter et son équipe, la quête du génome minimal a commencé en 1995, lorsqu'ils ont séquencé le génome de *Mycoplasma genitalium*, une bactérie vivant dans le conduit urinaire humain et ne présentant que 517 gènes. C'est l'un des plus petits génomes connus pour un organisme capable de s'autorépliquer (un virus peut présenter encore moins de gènes, mais il doit infecter une cellule afin d'en détourner les fonctions et se répliquer).

En 2010, l'équipe de Craig Venter a synthétisé une réplique du génome de *Mycoplasma mycoides* (un parasite des ruminants qui a l'avantage de se répliquer plus vite que *M. genitalium*) et l'a substituée au matériel génétique d'une cellule d'une autre espèce

de mycoplasme. L'expérience a démontré la possibilité de synthétiser chimiquement à grande échelle de l'ADN et de l'injecter dans une cellule pour produire un organisme viable. Les chercheurs se sont ensuite servis de ce génome de synthèse pour déterminer les gènes indispensables ou superflus à la vie de la cellule.

Les biologistes ont d'abord sélectionné et inactivé eux-mêmes les gènes qui leur semblaient inutiles, à partir des connaissances du fonctionnement d'une cellule, mais l'approche était inefficace. Ils ont alors changé de stratégie et procédé par tâtonnement. Le génome de *M. mycoides* a été coupé en plusieurs éléments, qui pouvaient être assemblés tous ou en partie. En testant alors la viabilité de la cellule munie du génome

recombiné, les chercheurs ont éliminé, par essais successifs, les gènes non indispensables.

Le résultat final est une cellule de synthèse, nommée JCVI-syn3.0, comprenant 473 gènes. Parmi eux, 41 % participent à la régulation de l'expression du génome, 18 % à la structure et aux fonctions de la membrane, 17 % au métabolisme et 7 % à la préservation de l'information génétique. Certains gènes n'ont été ainsi classés que grâce à l'étude de leur structure, car leur rôle précis dans la cellule n'a pu être identifié, et, par ailleurs, la fonction de 79 gènes est totalement inconnue. Au total, 149 gènes ont un rôle non identifié, ce qui représente près d'un tiers du matériel génétique ! Les chercheurs s'attendaient à trouver des gènes dont le rôle serait inconnu,

Médecine

Comment Zika s'attaque aux neurones

Alors que l'épidémie du virus Zika se poursuit sur le continent sud-américain et aux Caraïbes, le nombre de manifestations neurologiques associées au virus s'est multiplié. Des chercheurs ont précisé comment le virus s'en prend au système nerveux. Le point avec Annie Lannuzel, professeure de neurologie au centre hospitalo-universitaire de Pointe-à-Pitre, en Guadeloupe, et chercheuse Inserm à l'Institut du cerveau et de la moelle épinière, à Paris.

mais pas plus de 10%... Pour Jack Szostak, biochimiste à l'université Harvard, «le plus intéressant dans ce résultat est qu'il montre ce que nous ne savons pas».

La performance de l'équipe de Craig Venter indique qu'il y a encore beaucoup à découvrir sur les fonctions indispensables à la vie. Par ailleurs, dépouillée de toute complexité inutile, la cellule JCVI-syn3.0 pourra servir de base à de nombreux travaux fondamentaux. Par exemple, les biochimistes l'utiliseront comme plateforme pour y étudier des fonctions précises qu'ils ajouteront une à une.

Cependant, il ne faut pas voir en JCVI-syn3.0 la cellule minimale universelle. À partir d'une autre bactérie que *M. mycoides*, le génome minimal aurait pu être très différent. François Képès, de l'Institut de biologie systémique et synthétique de Genopole, à Evry, souligne que «certains principes quasi universels pourraient émerger d'une telle approche. Pour cela, il faudrait non pas fabriquer un génome viable, mais toute une série, afin de tester par comparaison certaines hypothèses sur ce qui rend un génome fonctionnel, ce qui le rend stable, etc.»

JCVI-syn3.0 a un cycle de répllication de trois heures et requiert un milieu de croissance riche et coûteux. Ce n'est pas économiquement intéressant, mais Craig Venter espère exploiter le potentiel de la biologie de synthèse afin de créer des fonctionnalités cellulaires sur mesure et produire des composants destinés au secteur pharmaceutique ou chimique. Dès lors, plus que jamais, une réflexion éthique est nécessaire pour encadrer l'usage de tels outils.

Sean Baillly

Science, vol. 351, p. 1414, 2016

Quelles manifestations neurologiques ont été associées au virus ?

Annie Lannuzel: L'infection par le virus Zika peut provoquer des syndromes de Guillain-Barré – une atteinte du nerf périphérique –, détectés notamment lors de l'épidémie de Polynésie française entre octobre 2013 et mai 2014, où le nombre de cas a été multiplié par 20. Les 42 cas ont *a posteriori* été rattachés au virus Zika, car des anticorps contre le virus ont été retrouvés chez tous. Plus récemment, des atteintes du système nerveux central ont été décrites sur des cas isolés: une myélite (inflammation de la moelle épinière avec déficit moteur des quatre membres) survenue mi-janvier chez une jeune femme de 15 ans, et une encéphalite chez un patient de 81 ans. Dans les deux cas, le virus était présent dans le liquide céphalorachidien, ce qui n'est pas le cas avec Guillain-Barré, qui survient au décours de l'infection.

Et chez les fœtus et les nouveau-nés ?

A. L.: Le lien entre microcéphalie et infection par le virus Zika est maintenant établi: le virus a été détecté dans le tissu cérébral de fœtus après avortement, ainsi que dans le liquide amniotique. On observe aussi, chez les femmes enceintes infectées, une augmentation des anomalies

échographiques. Le risque de microcéphalie est estimé à 1% et semble plus élevé lorsque l'infection est contractée durant le premier trimestre de grossesse.

Pourquoi ne s'aperçoit-on que maintenant de ces complications ?

A. L.: Zika est un flavivirus, comme le virus de la dengue, transmis par le même moustique et entraînant parfois des myélites ou des encéphalites. Pourquoi n'a-t-on pas découvert ces



Annie Lannuzel, professeure au CHU de Pointe-à-Pitre

pathologies dans des épidémies de Zika antérieures, notamment celle qui a sévi sur l'île de Yap (Micronésie) en 2007? Soit les manifestations n'existaient pas, puis le virus s'est transformé, soit elles n'ont pas été repérées. Nous n'avons pas encore les moyens de répondre.

Comment le virus agit-il sur les neurones ?

A. L.: En mars, une étude coordonnée par Guo-li Ming, de l'université Johns Hopkins, a donné des éléments de réponse,

notamment concernant la microcéphalie. Les biologistes ont montré *in vitro* que des précurseurs de neurones peuvent être infectés par le virus. Zika s'y réplique, entrave la progression du cycle cellulaire et diminue la croissance de ces précurseurs, voire entraîne leur mort cellulaire. Il altère aussi l'expression de gènes, dont certains sont impliqués dans la transcription de l'ADN en ARN. Les neurones matures sont en revanche moins sensibles au virus. Hormis chez le fœtus, on n'a pas d'indication sur sa capacité à envahir le système nerveux. L'action du virus peut être directe, par infection des neurones ou des cellules gliales, ou liée à l'inflammation qu'il entraîne. Cela reste à étudier.

Qu'impliquent ces découvertes sur Zika ?

A. L.: Dans notre démarche diagnostique au quotidien, nous avons intégré la composante Zika. Devant tout tableau neurologique évocateur, nous recherchons la présence du virus ou de ses anticorps. Le diagnostic d'infection par Zika doit cependant être amélioré. Il reste aussi beaucoup à apprendre sur les manifestations neurologiques dues à Zika ou à d'autres virus. En effet, dans de nombreuses situations cliniques, l'agent infectieux reste inconnu.

Marie-Neige Cordonnier

Mathématiques

Une nouvelle régularité dans la suite des nombres premiers

La répartition des nombres premiers semble en grande partie aléatoire. Deux mathématiciens viennent toutefois de mettre en évidence une propriété passée inaperçue : deux nombres premiers successifs se terminent par le même chiffre plus rarement qu'attendu.



Les nombres premiers occupent une place particulière en mathématiques. Depuis des millénaires, les mathématiciens décortiquent les propriétés de ces entiers qui ne sont divisibles que par 1 et par eux-mêmes. Kannan Soundararajan et Robert Lemke Oliver, de l'université Stanford aux États-Unis, viennent de découvrir une propriété étonnante portant sur le chiffre par lequel se terminent deux nombres premiers consécutifs.

Les mathématiciens savent que la répartition des nombres premiers n'est pas complètement aléatoire : on connaît des régularités, tel le biais de Tchebychev selon lequel il y a plus de nombres premiers de la forme $4k+3$ que $4k+1$. Kannan Soundararajan et Robert Lemke Oliver viennent de mettre en évidence un autre biais : si l'on considère par exemple un nombre premier se terminant par le chiffre 9, le suivant a 65% de chance de plus de se terminer par 1 que par 9.

Ce qui a étonné les chercheurs est que ce biais est beaucoup plus

fort que le biais de Tchebychev. Les deux chercheurs ont ainsi montré numériquement (en analysant 400 milliards de nombres premiers) que les nombres premiers se terminant par le même chiffre ont tendance « à se repousser ». Personne ne l'avait remarqué jusqu'à présent.

Comment expliquer qu'il soit plus rare de trouver deux nombres premiers consécutifs ayant le même chiffre final ? La première idée est la suivante. Prenons par exemple le nombre premier 43. Les nombres potentiellement premiers qui suivent sont 47, 49 et 51, avant d'arriver à 53 qui se termine aussi par un 3. Il serait donc plus vraisemblable de tomber sur un nombre premier se terminant avec un autre chiffre (et de fait, 47 est premier). L'argument est intuitivement sensé, mais il ne permet pas d'expliquer l'importance du biais.

L'explication se cacherait dans une conjecture proposée par les mathématiciens britanniques Godfrey Hardy et John Littlewood en 1923. Celle-ci

donne une estimation de la fréquence d'apparition de certaines structures de nombres premiers nommés k -tuples, par exemple les doublets de nombres premiers séparés de deux unités (aussi nommés nombres premiers jumeaux, tels 17 et 19), mais aussi des triplets, des quadruplets, etc. Cette conjecture, très générale, englobe par exemple la conjecture des nombres premiers jumeaux, qui suppose qu'il existe une infinité de telles paires.

En examinant de plus près la conjecture de Hardy et Littlewood, on obtient des corrélations sur les derniers chiffres des nombres premiers qui se suivent. Et ces résultats correspondent parfaitement aux observations de Kannan Soundararajan et Robert Lemke Oliver.

Les mathématiciens s'interrogent : ce biais est-il juste une bizarrerie des nombres premiers ou a-t-il un sens plus fondamental qui pourrait avoir une influence sur d'autres de leurs propriétés ?

S. B.

<http://arxiv.org/abs/1603.03720>

246

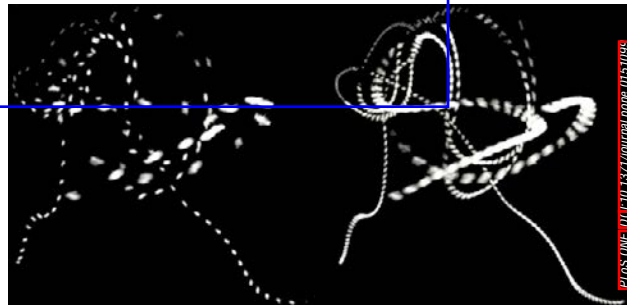
On a démontré qu'il existe une infinité de paires de nombres premiers séparés de 246 unités. Le cas des nombres premiers jumeaux, séparés de deux unités, reste à prouver.*

Zoologie

Vision ultrarapide chez les passereaux

Quand une lumière clignote à plus d'une soixantaine de hertz, l'œil humain n'est plus capable de percevoir les alternances lumière-obscurité. Qu'en est-il chez d'autres animaux ? Anders Ödeen et ses collègues, des universités d'Uppsala et de Stockholm, en Suède, ont mesuré cette capacité chez trois espèces de passereaux, et ont trouvé que ces oiseaux ont une vision au moins deux fois plus rapide que la nôtre : son pouvoir de résolution temporelle va jusqu'à 145 hertz !

Les zoologistes suédois ont réalisé des expériences sur la mésange bleue, le gobe-mouche à collier et le gobe-mouche noir. Elle consistaient à présenter aux oiseaux deux types de signaux lumineux émis par des LED : une lumière perçue comme constante (la fréquence de clignotement, due à la fréquence de la source électrique, dépassait les 2000 hertz), et une lumière clignotant à une fréquence réglable. Les oiseaux étaient entraînés de façon à ce qu'ils préfèrent s'approcher de



Le vol de deux mouches filmé à 40 (à gauche) et 120 (à droite) images par seconde. La première fréquence correspond à celle d'un œil humain, la seconde à celle d'un œil de gobe-mouche...

l'une des deux sources, une récompense alimentaire étant à la clé.

Cette procédure a permis de mesurer, pour diverses intensités lumineuses, la fréquence maximale perçue par chaque oiseau, au-delà de laquelle il était incapable de distinguer les deux sources de lumière. En moyenne, elle est d'environ 130-140 hertz pour les trois espèces étudiées. Cela dépasse d'une cinquantaine de hertz la plus haute fréquence mesurée chez les autres vertébrés, ainsi que les valeurs attendues par

un modèle fondé sur la masse corporelle et le rythme métabolique.

La sélection naturelle semble donc avoir favorisé une vision rapide chez ces espèces, qui se déplacent de façon agitée dans un environnement arbustif encombré et se nourrissent d'insectes attrapés parfois en vol. On peut alors s'attendre à ce que la plupart des passereaux aient une vision moins perçante que celle d'un aigle, mais bien plus rapide.

Maurice Mashaal

PLoS ONE, en ligne le 18 mars 2016

Kawashima contre sclérose

Avec ses calculs et ses puzzles, le jeu d'entraînement cérébral du Dr. Kawashima, édité par la société Nintendo, ne « rajeunit » pas notre cerveau en améliorant nos aptitudes cognitives – si nous sommes en bonne santé. En revanche, il est bénéfique pour certains patients atteints de sclérose en plaques, selon Laura De Giglio et ses collègues, de l'université de Rome. Dans cette maladie, le système immunitaire détruit la gaine des prolongements neuronaux, ce qui gêne la circulation des signaux nerveux. Les symptômes dépendent des régions nerveuses touchées et peuvent être des troubles de la mémoire, de l'attention, de la planification... Or les patients qui se sont adonnés pendant 2 mois au jeu, à raison de 5 sessions de 30 minutes par semaine à domicile, ont amélioré leurs facultés cognitives. Et les bénéfices observés étaient liés à une augmentation de la connectivité du thalamus, une plaque tournante cérébrale qui permet entre autres de prendre des décisions.

Neurosciences

Alzheimer : faire revenir des souvenirs

Les patients atteints de la maladie d'Alzheimer depuis peu de temps souffrent essentiellement de troubles de la mémoire à long terme dite épisodique (celle qui permet de nous souvenir d'événements du passé avec leur contexte – date, lieu, émotions associées). Ces troubles sont dus au dysfonctionnement de neurones dans l'hippocampe, une région cérébrale surtout impliquée dans l'encodage, la consolidation et le rappel des souvenirs. Mais ces derniers ont-ils disparu ou sont-ils seulement inaccessibles ?

C'est la question à laquelle ont répondu Dheeraj Roy, du MIT

aux États-Unis, et ses collègues, en utilisant différents modèles de souris génétiquement modifiées pour souffrir de la maladie d'Alzheimer. Âgés de 7 mois, les rongeurs ne présentent que des troubles de la mémoire à long terme et oublient ainsi une pièce où ils ont reçu des chocs électriques 24 heures plus tôt.

Les chercheurs ont alors constaté que, dans leur gyrus denté, une région de l'hippocampe, les souris présentent moins d'épines dendritiques, des excroissances des câbles neuronaux où se font les contacts avec les autres neurones, que les souris à la mémoire normale. Ils ont ensuite

stimulé l'activité et la « pousse » de ces épines (c'est-à-dire la plasticité cérébrale) par optogénétique, en transférant dans leurs neurones des protéines qui ne s'activent que sous l'effet de la lumière. Résultat : les souris malades ont retrouvé la mémoire du choc douloureux subi et leurs neurones ont réacquis de nombreuses épines dendritiques, l'effet persistant plusieurs jours.

Dans les premiers stades de la maladie d'Alzheimer, c'est donc le rappel des souvenirs qui serait défaillant, et cette défaillance serait liée à une moindre plasticité des neurones de l'hippocampe.

Bénédicte Salthun-Lassalle

Nature, en ligne le 16 mars 2016



Des chercheurs ont réussi à rendre la mémoire à des souris atteintes des premiers stades de la maladie d'Alzheimer, en stimulant directement l'activité de certains neurones.

L'avantage de se ressembler

Vous en connaissez sans doute, des couples où les partenaires adoptent les mêmes manies. Cette convergence comportementale n'est pas l'apanage de notre espèce : Chloé Laubu et ses collègues de l'université de Bourgogne l'ont trouvée chez un poisson tropical. Les chercheurs ont arrangé des « mariages » entre des individus aux comportements très différents (l'un était par exemple agressif et l'autre non) et montré qu'ils finissaient par se ressembler. Ils augmentaient alors leur succès reproductif, se coordonnant mieux pour s'occuper de leur progéniture et la défendre contre les prédateurs.

La Lune a basculé

Sur la Lune, la glace d'eau doit se cacher à l'ombre pour perdurer. Or Matthew Siegler, de l'Institut des sciences planétaires, à Tucson, aux États-Unis, et ses collègues ont révélé certaines anomalies. Les régions les plus riches en glace d'eau ne sont pas aux pôles mais dans deux régions à 5° des pôles et aux antipodes l'une de l'autre. D'après les chercheurs, ces régions ont été les pôles il y a plusieurs milliards d'années, puis la Lune a basculé. La cause de ce changement d'axe serait la formation de la région Procellarum, une mer de basalte qui a fortement changé la répartition de la masse lunaire.

Une devoreuse de plastique

Environ 311 millions de tonnes de plastique sont produites chaque année. Seuls 14 % sont recyclés... Mais l'équipe de Shosuke Yoshida, de l'institut de technologie de Kyoto, a découvert une bactérie, *Ideonella sakaiensis*, capable de dégrader le polytéréphthalate d'éthylène (PET). Elle utilise deux enzymes : la première coupe la longue chaîne du PET en paires de monomères qui sont ensuite hydrolysées par la seconde. Le processus est lent, mais ouvre des pistes pour le recyclage.

Biomécanique

Les nœuds inégalement espacés du bambou



© Shutterstock.com / iStockphoto

Le long d'une tige, l'écart entre nœuds varie légèrement, ce qui optimise la résistance au vent, par exemple.

Hiroyuki Shima, de l'université de Yamanashi au Japon, et deux collègues se sont intéressés aux espacements entre deux nœuds successifs le long des tiges de bambou. Ils avancent des arguments et des calculs de mécanique des structures qui éclairent pourquoi et comment ces espacements varient le long d'une même tige.

L'internœud est en effet légèrement plus long vers le milieu de la tige et se réduit légèrement à mesure qu'on s'approche de l'une ou l'autre extrémité. Pour le comprendre, les chercheurs japonais sont partis de l'idée que, pour présenter une résistance optimale au fléchissement, la tige du bambou a une structure mettant en jeu un compromis dans la répartition des nœuds – qui renforcent la

tige, mais alourdissent le bambou et ralentissent sa croissance. En raisonnant sur la déformation d'un internœud (un cylindre creux fermé à ses deux extrémités par des cloisons circulaires) sous l'effet d'une force de flexion, les chercheurs définissent un paramètre de déformation qui dépend de la longueur de l'internœud, de l'épaisseur de la paroi formant la tige et du rayon de celle-ci. Et ils sont amenés à la conclusion que ce paramètre doit augmenter régulièrement à mesure qu'on s'élève le long de la tige. C'est ce qu'ils constatent, sauf vers le sommet du bambou où les nœuds sont denses, probablement pour supporter les abondantes jeunes branches.

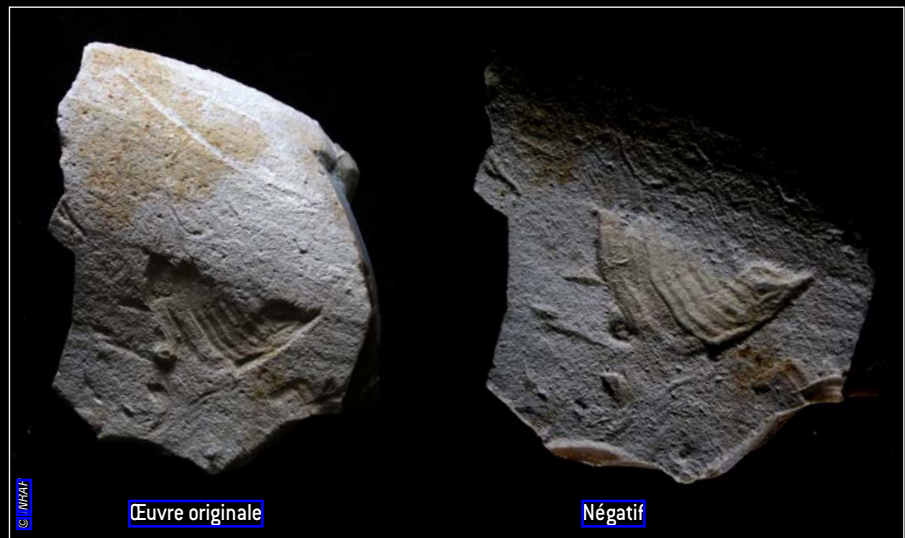
M. M.

Physical Review E, vol. 93, 022406, 2016

Insolite

L'alouette préhistorique de Cantalouette

Un oiseau chantait en buvant dans une flaque. Une alouette, ou un passereau semblable. Charmé, un tailleur de pierre s'interrompt pour la dessiner. Quelque 35 000 ans plus tard, la fouille de sauvetage du site de Cantalouette, non loin de Bergerac, en Dordogne, a amené l'Inrap à retrouver ce passereau gravé sur le revers calcaire d'un éclat de silex. Selon les chercheurs, il s'agit sans doute de l'un de ces nombreux exercices spontanés auxquels devaient se livrer les artistes préhistoriques. Un brouillon, en somme!



© Inrap

Œuvre originale

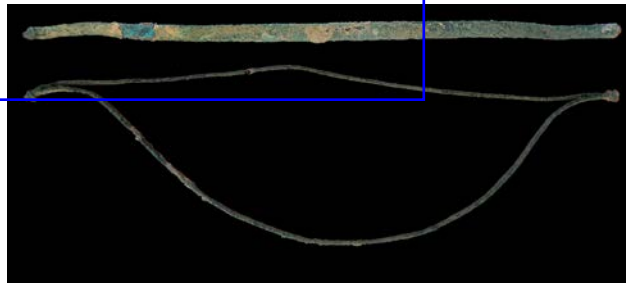
Négatif

Archéologie

L'arc de l'âge du Fer d'Arabie retrouvé

La mission archéologique française dirigée par Guillaume Gernez vient de découvrir au sultanat d'Oman des répliques en bronze de flèches, de carquois et d'arcs d'une forme qui aurait été employée dans la péninsule Arabique au cours du deuxième âge du Fer, soit entre 900 et 600 avant notre ère.

Les archéologues ont mis au jour ces pièces dans un lieu de rassemblement ou sanctuaire, composé de deux bâtiments et quelques aménagements annexes, au pied du djébel Mudhmar, une montagne du centre du sultanat. Comme la plupart des objets retrouvés sur place se rapportent à la guerre, les archéologues supposent qu'il s'agissait d'offrandes à un dieu guerrier. Sans doute est-ce pour rendre leurs



Dans l'Antiquité, des nomades arabes ont réalisé en bronze cette réplique d'arc afin de la déposer dans un sanctuaire en offrande à un dieu guerrier. Elle nous renseigne sur la forme de l'arc arabe antique.

témoignages de ferveur ostentatoires et durables que les utilisateurs du sanctuaire ont préféré des offrandes faites de bronze, une matière semi-précieuse.

Quelle était la population qui fréquentait le site? Selon Guillaume Gernez, une élite nomade qui prospérait grâce au commerce

du cuivre s'était constituée dans la région du djébel Mudhmar. Étant donné la richesse qu'ils transportaient, ces nomades devaient être constamment sur le pied de guerre, ce qui expliquerait l'importance du culte dédié à un dieu guerrier.

François Savatier

L'énergie du cœur galactique

Les astrophysiciens pensent qu'il existe des objets dans la Galaxie qui confèrent une énergie extrême, de l'ordre du petaélectronvolt (10^{15} électronvolts), à des particules observées dans les rayons cosmiques qui bombardent la Terre. Mais de telles sources de rayons cosmiques n'ont pas été identifiées...

Cependant, l'expérience *HESS*, en Namibie, a collecté pendant dix ans des données sur les rayons cosmiques provenant du centre de la Voie lactée. Et leur analyse montre que l'intensité de ces émissions serait due au bombardement des nuages moléculaires géants de la région par des protons d'une énergie de l'ordre du petaélectronvolt. Une énergie acquise probablement grâce au trou noir supermassif qu'abrite le centre de la Galaxie.



POUR ÉNERGISER VOTRE CARRIÈRE

AYEZ LE RÉFLEXE UPMC

FAITES LE CHOIX DE L'EXCELLENCE

UPMC : UNIVERSITÉ DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET MÉDICALE

Une offre complète qui s'adapte à vos besoins

> Formations qualifiantes inter entreprises

> Formations sur mesure

> Parcours individualisés

www.fc.upmc.fr

UPMC
SORBONNE UNIVERSITÉS



SANTÉ

ÉCOLOGIE - BIODIVERSITÉ

CHIMIE ÉLECTRONIQUE

BIOLOGIE

MÉCANIQUE

MATHÉMATIQUES

INFORMATIQUE

Formation continue
Université Pierre & Marie Curie

formation.continue@upmc.fr
01 44 27 82 82

Virologie

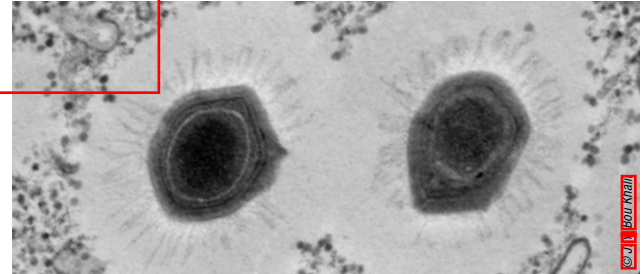
Un système CRISPR dans un virus géant

Même les virus géants ont leurs propres virus – les virophages – et, du moins pour certains, un système immunitaire pour les combattre. L'équipe de Didier Raoult, à Aix-Marseille Université (CNRS/IRD/Inserm), vient de mettre en évidence un mécanisme de défense ressemblant au système CRISPR-Cas. Décrit ces dernières années chez nombre de bactéries et d'archées, ce système insère dans une « banque » (CRISPR) des séquences d'ADN des virus rencontrés, puis, lors d'une nouvelle infection, il compare l'ADN du nouveau virus à sa banque. S'il reconnaît une séquence, une enzyme (Cas) détruit l'ADN viral, bloquant ainsi la propagation de l'infection.

En 2014, l'équipe de Didier Raoult avait découvert un

virophage, Zamilon, qui infecte certains mimivirus – une famille de virus géants –, mais pas tous. Les mimivirus résistants gardaient-ils une mémoire du virophage ? Pour le savoir, les biologistes ont analysé le génome de 60 souches de mimivirus et regardé si des séquences correspondaient avec l'ADN de Zamilon. Résultat : les mimivirus résistants arboraient de telles séquences. Et à côté d'elles, d'autres codaient des enzymes qui déroulent et dégradent l'ADN, comme dans le système CRISPR-Cas. De plus, si on bloquait l'activité d'un de ces composants, les mimivirus ne résistaient plus au virophage.

Pour Didier Raoult, les virus géants constitueraient une quatrième branche du vivant, aux côtés des bactéries, des archées



Une lignée de mimivirus, un virus de 400 nanomètres (ci-dessus), a développé un système immunitaire proche de celui des bactéries.

et des eucaryotes. Leur génome comporte plus d'un millier de gènes (contre une dizaine chez les virus classiques), dont certains sont impliqués dans la traduction de l'ADN en protéines ou dans d'autres fonctions qu'on ne trouve habituellement pas chez les virus. Le système de défense mis au jour est une spécificité supplémentaire

des virus géants. Et, pour Didier Raoult, un argument en faveur de son hypothèse. Commun aux bactéries, aux archées et aux virus géants, le système de défense de type CRISPR-Cas leur viendrait d'un ancêtre commun...

M.-N. C.

A. Levasseur et al., *Nature*, vol. 531, pp. 249–252, 2016



le Palais de la Découverte

les conférences

cycle Les voyages spatiaux habités : un rêve ?

Les samedis à 15h

Conseiller scientifique : Frédéric Tognella, spécialiste de la médecine spatiale et du sport, fondateur de Tognella Biomed Consult.

21 mai
Les radiations : danger pour les spationautes
Avec Frédéric Tognella

28 mai
L'effet de l'apesanteur sur le corps
Avec Frédéric Tognella

4 juin
Quelles applications sur notre vie quotidienne ?
Avec Patrick Eymar, président de N4E, ancien responsable de la stratégie à Astrium Space Transportation (Airbus).

11 juin
Mars : pour quand le voyage ?
Avec Alain Souchier, président de l'Association Planète Mars.

programme complet sur palais-decouverte.fr

Avec le soutien de







Archéologie

Une rare panoplie romaine

Dans la seconde moitié du III^e siècle, un incendie ravage la réserve d'une villa rurale située à Saint-Clément, près de Sens. Dans la masse compacte qui a rempli sa cave et protégé son contenu de l'air, l'Inrap vient de retrouver près de 200 outils agricoles. Ce matériel correspond bien à ce que préconisaient les auteurs antiques de traités d'agronomie.

Par exemple, dans le chapitre X de *De re rustica*, Caton l'Ancien (234-149 avant notre ère) dresse la liste suivante des « instruments en fer » à fournir à son intendant : huit fourches, huit sarcloirs, quatre pelles, cinq houes, deux râtaux à quatre dents, trois faux à foin, six faux à chaume, cinq croissants, trois haches, trois coins, un pilon à blé, deux pelles à feu... Cette liste est très similaire à celle de la panoplie d'outils agricoles romains de Saint-Clément qui, à ce stade, est sans équivalent.

F. S.

Mathématiques

Andrew Wiles reçoit le prix Abel

L'Académie norvégienne des sciences et des lettres a décerné le prix Abel 2016 à Andrew Wiles, de l'université d'Oxford, pour « son éblouissante démonstration du dernier théorème de Fermat en utilisant la conjecture de modularité sur les courbes elliptiques semistables, et ouvrant une nouvelle ère en théorie des nombres ».

L'histoire commence en 1637, lorsque Pierre de Fermat énonça une conjecture : « Il n'existe pas de solution entière pour l'équation $x^n + y^n = z^n$ quand n est strictement plus grand que 2. » Près de 350 ans plus tard, en 1993, Andrew Wiles en donna la preuve. Elle consistait à démontrer d'abord une autre conjecture, dite de Taniyama-Shimura, dont le lien avec la conjecture de Fermat avait été établi en 1984. La conjecture de Taniyama-Shimura stipule que « pour chaque courbe elliptique, il existe une forme modulaire correspondante ». Andrew Wiles, spécialiste des courbes elliptiques (objets définis par des équations cubiques à deux variables) et des formes modulaires (objets abstraits avec un haut degré de symétrie), a prouvé le lien d'équivalence entre ces objets et, du même coup, le grand théorème de Fermat.

S. B.

Géophysique

Comment l'olivine se déforme

Une équipe animée par Patrick Cordier, de l'université de Lille, vient d'observer directement la propagation d'une dislocation dans un cristal d'olivine, l'un des principaux silicates dont est constitué le manteau terrestre. Or une meilleure connaissance de ce phénomène dans les roches mantelliques est nécessaire pour améliorer notre description des mécanismes de la dérive des continents.

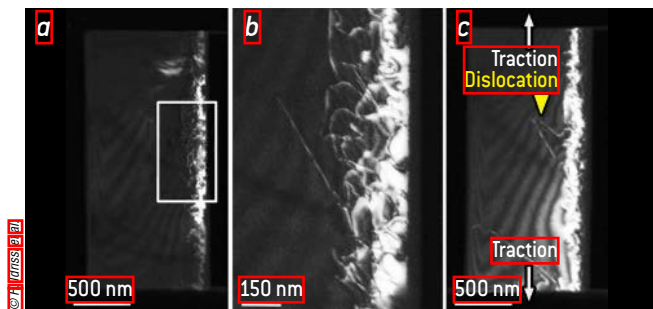
Les dislocations sont des fronts internes au cristal, où les liaisons interatomiques sont brisées. Elles naissent lorsque – par choc, compression ou étirement – on déforme un matériau cristallin afin d'y créer des contraintes, c'est-à-dire la mise sous pression de certains plans internes. Pour en créer, l'équipe de Patrick Cordier a mis au point un appareil capable de tirer aux deux extrémités d'un nanocristal d'olivine sans le briser, de sorte que des dislocations peuvent s'y

propager à température ambiante, au sein d'un microscope électronique par transmission. Cette nouvelle méthode rend les observations plus fiables que celles des expériences précédentes à température élevée.

Les chercheurs sont parvenus à mesurer les modalités de la propagation des dislocations dans l'olivine. Présentes en grand nombre dans le minéral, elles interagissent, s'enchevêtrent et tendent à s'accumuler aux interfaces entre grains cristallins, ce qui explique que la roche se déforme sans rompre, bref, sa ductilité. Désormais appréciée sur des bases expérimentales plus solides, la ductilité de l'olivine est l'un des paramètres des modèles numériques décrivant la façon dont les roches mantelliques se déforment pour rendre possible le glissement des plaques tectoniques.

F. S.

H. Idrissi et al., *Science Advances*, vol. 2(3), e1501671, 2016



En (a), l'échantillon d'olivine avant déformation. En (b), l'intérieur du rectangle montrant une couche endommagée. En (c), la naissance d'une dislocation (triangle) sur le point de se propager dans l'olivine.

Coup de vieux pour Homo floresiensis

En 2003, on annonçait la découverte, sur l'île indonésienne de Florès, d'*Homo floresiensis*. Haute de un mètre, cette espèce humaine était dotée d'un cerveau de 400 centimètres cubes et aurait été encore présente il y a 18 000 ans. Une époque aussi récente semblait peu plausible. Ses découvreurs viennent de réétudier de fond en comble la grotte où *H. floresiensis* a été mis au jour. Ils concluent que son fossile date d'il y a entre 100 000 et 60 000 ans, une fourchette temporelle beaucoup moins problématique.

L'Antarctique contribue à la montée des eaux

Au Pliocène, il y a près de 3 millions d'années, le niveau moyen des océans était plus haut qu'il ne l'est aujourd'hui. Or les modèles d'évolution de la calotte polaire antarctique, en particulier sa fonte, ne restituaient pas la bonne élévation du niveau des mers. Deux climatologues américains,

Robert DeConto et David Pollard, ont amélioré les modèles en incluant certains phénomènes de fragilisation de la calotte. Ils reproduisent correctement les événements du passé. Utilisé avec des scénarios climatiques, leur modèle prévoit que l'Antarctique pourrait contribuer jusqu'à un mètre à la montée des eaux d'ici 2100.

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



Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

POINT DE VUE

Science et responsabilité : une réflexion collective s'impose

La controverse autour du tremblement de terre de L'Aquila en 2009, qui a conduit à la condamnation de scientifiques, nous oblige à repenser ensemble la représentation que nous nous faisons des sciences et donc, a fortiori, de leur responsabilité sociale.

Léo COUTELLE

Le 22 octobre 2012, un verdict très attendu a soulevé une indignation assez unanime dans la communauté scientifique. Sept scientifiques de l'Institut italien de géophysique et vulcanologie, membres de la commission italienne des grands risques, ont été condamnés à six années de prison et 9 millions d'euros d'amende pour homicide par imprudence. Les scientifiques étaient accusés d'avoir sous-estimé le risque sismique à L'Aquila. Dans cette petite ville italienne, trois ans plus tôt, le 6 avril 2009, un tremblement de terre avait causé la mort de plus de 300 personnes, saccageant le centre historique et faisant des dizaines de milliers de sans-abri.

Or six jours avant le séisme, le 31 mars 2009, les membres de la commission, jugée compétente pour l'évaluation des risques sismiques, s'étaient réunis à L'Aquila pour donner un avis sur la probabilité qu'un tremblement de terre majeur y survienne. S'appuyant sur l'analyse d'une série de secousses ayant frappé L'Aquila pendant les mois précédents, la commission avait conclu, en substance, qu'il n'y avait pas lieu de s'affoler, qu'il n'y aurait pas de secousses plus importantes que celles des mois précédents. Six jours plus tard, l'Italie connaissait l'une de ses plus grandes catastrophes sismiques.

La réaction fut très vive dans la communauté scientifique, notamment par l'intermédiaire d'une pétition qui soulignait qu'une

telles condamnations étaient inacceptables parce qu'il était impossible de prédire un séisme avec précision, et donc que cette décision de justice ne prenait pas en compte la nature même de la connaissance scientifique.

On a aussi reproché au juge un verdict disproportionné et inapproprié : l'argument principal du réquisitoire contre les membres de la commission concernait le manquement aux vertus attendues de la communauté scientifique. Les scientifiques auraient mal

**Être éthiquement responsable
c'est être en capacité de
« répondre de »
et de « répondre à »**

communiqué, avec peu de prudence et de nuances. Pour nombre de scientifiques, en convoquant ainsi l'éthique des vertus du scientifique, en se faisant police des vertus, la justice dépassait ses attributions.

Le 10 novembre 2014, les sept scientifiques ont été acquittés en appel et, en novembre dernier, la Cour de cassation a appuyé cette décision. Cependant, quelle que soit l'issue du procès, la responsabilité des scientifiques est à repenser. En effet, étant donné la portée de la science sur nos existences, cette dernière ne peut plus être vue comme une entreprise désintéressée et unifiée dont le seul objectif est l'avancement des connaissances.

La responsabilité des scientifiques est engagée. Mais de quoi s'agit-il ? Au-delà de sa dimension juridique ou morale, la responsabilité comporte aussi une part éthique. Être éthiquement responsable, c'est être en capacité d'une part de « répondre de », c'est-à-dire de rendre des comptes en raison d'une mission qui nous a été confiée, et, d'autre part, de « répondre à », c'est-à-dire de prendre en considération les attentes et les interrogations des individus ou collectifs avec qui nous sommes en relation.

Il ne s'agit donc pas seulement de savoir si l'on peut prédire un séisme avec certitude (responsabilité juridique) ou d'exiger certaines vertus dans la communication à son égard (responsabilité morale). La responsabilité éthique, notamment dans sa dimension sociale, exige un travail beaucoup plus profond qui consiste à réinterroger les valeurs et les finalités de la démarche scientifique. La science repose sur diverses valeurs ayant un rapport direct avec la façon de produire les connaissances, telles que la rationalité, la cohérence ou l'adéquation avec l'expérience. Mais d'autres, plus contextuelles, entrent aussi en jeu, telles que le bien-être, la justice ou l'intérêt économique. Comment prendre en compte leur influence dans le processus scientifique ? Autrement dit, parler de responsabilité sociale des sciences, c'est avant tout consentir à un effort conceptuel qui vise à renouveler la représentation que l'on peut en avoir. Il ne peut donc s'agir que d'une réflexion et d'une responsabilité collectives.

Dans le cas de L'Aquila, par exemple, un aspect est peu souvent rappelé, voire jamais : les experts de la commission des grands risques, tous de grands chercheurs, sont intervenus en partie en réponse à une alerte d'un autre scientifique travaillant à l'observatoire national du Gran Sasso (le plus grand laboratoire souterrain du monde en physique des particules), qui utilisait une technique controversée – la détection de radon, notamment le radon 222. Pour ce scientifique, qui n'est pas un chercheur mais un technicien, l'émission de radon 222 serait un signe précurseur robuste de la survenance d'un séisme.

L'hypothèse du radon est connue. Elle a fait l'objet de publications et de rares revues critiques. Sept jours après le tremblement de terre, l'Institut français de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), qui étudie les émissions de radon depuis plus de vingt ans, a publié son point de vue sur cette hypothèse à la lumière des publications scientifiques sur le sujet. Pour l'IRSN, si l'on enregistre bien des variations des teneurs en radon dans les zones sismiques, indiquant que la circulation des fluides souterrains est perturbée par les contraintes et déformations qui préparent ou accompagnent les tremblements de terre, on ne peut passer de ce constat à une prévision de séisme : on est en effet incapable d'associer aux variations observées des informations telles que la profondeur du foyer, l'épicentre et la magnitude du séisme susceptible de survenir.

Il n'est pas de mon ressort de juger de la pertinence de cette technique, de sa pertinence relative par rapport aux autres ou encore du bagage théorique qui la soutient. Certes, le radon ne permet pas de détecter avec certitude un séisme – tout comme les autres techniques mises en œuvre. Mais là n'est pas la question. La question est de savoir si cette hypothèse a droit à la considération scientifique au même titre que les autres hypothèses. Or elle n'a visiblement pas été prise au sérieux par la commission italienne des grands risques.

Ce fait, que l'on peut considérer comme marginal, est pourtant un révélateur de la difficulté majeure à penser la science comme le lieu d'expression d'un pluralisme. Il questionne sur la méthode scientifique elle-même, sur la façon de composer avec une multiplicité de savoirs, sur la capacité d'accueillir la diversité



SEPT SCIENTIFIQUES ONT ÉTÉ CONDAMNÉS EN 2012 à six ans de prison ferme pour homicide par imprudence après le tremblement de terre en avril 2009 à L'Aquila (*ci-dessus*), en Italie. Ils étaient accusés d'avoir sous-estimé le risque de séisme. Pourtant, aucune technique ne permet de prévoir un séisme avec certitude. Qui est le vrai responsable ?

L'AUTEUR



Léo COUTELLEC est chercheur en épistémologie et éthique des sciences contemporaines à l'université Paris-Sud et à l'Espace éthique Île-de-France.

BIBLIOGRAPHIE

L. Coutellec, *La Science au pluriel*, Quæ, 2015.

L. Coutellec, *Le temps des sciences impliquées*, *Écologie & Politique*, n° 51, 2015.

L. Coutellec, *De la démocratie dans les sciences*, *Matérialogiques*, 2013.

comme une valeur constitutive des sciences. Est-il possible aujourd'hui d'accueillir plusieurs hypothèses explicatives concurrentes qui, entre elles, sont incompatibles ? Dans le cas de L'Aquila, comme dans de nombreux exemples qui font le grain des sciences contemporaines (ainsi, on s'aperçoit aujourd'hui que la maladie d'Alzheimer a d'autres versants que neurologique), la pertinence d'un savoir scientifique ne tient pas à sa capacité à évacuer le « bruit » épistémique qui dérangerait ses certitudes ou qui bousculerait le courant principal du moment, mais plutôt à accueillir en son sein la diversité des perspectives, des disciplines, des points de vue, des styles et des démarches.

Une bonne science n'est ni une science neutre ni une science sans contexte, mais une science consciente de son implication radicale dans le réel. Ainsi, l'enjeu aujourd'hui n'est pas tant de construire des savoirs scientifiques robustes, mais bien des savoirs pertinents. Et le temps des sciences impliquées exige que ce critère de pertinence devienne le nouvel objet de la responsabilité sociale des sciences. ■



Réagissez au
Point de vue sur
www.pourlascience.fr

ENTRETIEN

Apple et le FBI : « Un système de chiffrement muni d'une trappe serait catastrophique »

Les données que contient un téléphone peuvent être cruciales dans une enquête judiciaire, mais prévoir un moyen d'y accéder en contournant le cryptage menace les libertés individuelles. Un compromis est-il possible ?



David POINTCHEVAL, chercheur au CNRS, est directeur adjoint du département d'informatique de l'ENS à Paris.

Dans l'enquête sur le massacre de San Bernardino commis fin 2015, le FBI n'arrivait pas à lire les données chiffrées du téléphone du tueur. Il a donc demandé l'aide du constructeur de l'appareil, Apple, qui a refusé. Les enquêteurs ont finalement réussi à débloquent le téléphone, mais, à terme, une solution envisagée par les autorités est que les logiciels de chiffrement soient dotés d'une trappe donnant accès, en cas d'enquête, aux informations cryptées. Sont ainsi posées de nombreuses questions sur la protection de la vie privée, mais aussi sur les moyens techniques qui offriraient un compromis. L'éclairage de David Pointcheval, directeur de recherche au CNRS, directeur adjoint du département d'informatique de l'ENS et responsable de l'équipe Inria Cascade.

POUR LA SCIENCE

Le chiffrement semble omniprésent sur nos ordinateurs et nos téléphones portables. Quel en est le principe ?

DAVID POINTCHEVAL : Aujourd'hui, quand vous faites un achat en ligne ou que vous envoyez un courriel, les informations sont chiffrées pour des raisons de sécurité. En général, l'objectif est de protéger vos données d'un usage malhonnête. Mais on

ne peut éviter que le chiffrement soit parfois un frein à une enquête, en protégeant les données d'une personne ayant des activités criminelles.

Pour comprendre les enjeux du conflit entre Apple et le FBI, il faut présenter les deux types de chiffrement, l'un dit symétrique et l'autre asymétrique. Le premier sert, par exemple, à chiffrer les données sur votre appareil. Il est la version moderne des codes utilisés par le passé : le mécanisme qui transforme vos données en un code illisible utilise une clé que vous êtes le seul à détenir. Et cette même clé sert à retraduire vos données en clair. Si vous voulez communiquer un message chiffré à un interlocuteur, celui-ci doit aussi détenir la clé de déchiffrement. Or, en général, vous ne partagez pas un tel secret avec le destinataire.

En 1976, les Américains Whitfield Diffie et Martin Hellman ont trouvé une solution (pour laquelle ils viennent de recevoir le prix Turing, l'équivalent du prix Nobel en informatique) : le chiffrement asymétrique. La méthode comprend deux clés, l'une privée et l'autre publique. Le destinataire d'un message à chiffrer vous envoie sa clé publique, que vous utilisez pour coder le message. Mais seule la clé privée du destinataire peut déchiffrer ce dernier.

L'algorithme RSA (du nom de ses inventeurs Ronald Rivest, Adi Shamir et Leonard Adleman) met en œuvre ce chiffrement asymétrique. La clé publique y est un nombre très grand, produit de

deux nombres premiers. La clé privée est formée justement par ces deux nombres premiers. La sécurité du système est fondée sur le fait que trouver les facteurs premiers à partir de la clé publique prendrait beaucoup trop de temps.

PLS

Quelle est la robustesse de ces méthodes de chiffrement ?

D. P. : L'algorithme symétrique standard AES (*Advanced Encryption System*) impose que les clés du chiffrement soient d'au moins 128 bits, soit environ 30 caractères. L'attaque classique consiste en une énumération exhaustive des combinaisons possibles. Pour donner une idée, une clé de 256 bits représente autant de combinaisons qu'il y a d'atomes dans l'Univers observable. D'autres types d'attaques ont été tentés, mais aucune n'a mis AES en défaut, pour l'instant.

Pour l'algorithme RSA, certaines attaques sont plus performantes que l'énumération exhaustive. Il y a quinze ans, on recommandait d'utiliser une clé de 150 chiffres (décimaux) ; elle est maintenant de 600 chiffres, afin que le temps de calcul requis pour trouver les facteurs premiers reste hors de portée.

Le point faible des systèmes de chiffrement se situe souvent au niveau du logiciel qui réalise le chiffrement. Par exemple, en 2013,

lorsque Edward Snowden a annoncé que la NSA (l'Agence américaine de sécurité) récoltait des données sur les citoyens américains en outrepassant ses prérogatives, un des programmes de la NSA exploitait des failles présentes dans certains logiciels de chiffrement. L'agence est obligée d'utiliser ce genre d'approches car, malgré ses moyens informatiques, elle ne parvient probablement pas à casser le code symétrique ou à factoriser les clés publiques du RSA.

PLS

Avec les révélations d'Edward Snowden, les gens se sont demandé comment mieux protéger leur vie privée. Quelle a été la réponse des grands groupes informatiques tels que Google ou Apple ?



DANS LE CONFLIT QUI OPPOSE APPLE AU FBI, le second voudrait que le groupe informatique développe un logiciel pour accéder aux données chiffrées d'un téléphone. Apple refuse, dans la mesure où un tel logiciel affaiblirait la protection de la vie privée des utilisateurs.

D. P. : Une autre technique d'écoute de la NSA était de se brancher directement sur les serveurs des grands opérateurs américains de téléphonie ou d'Internet. Les données y sont chiffrées par l'opérateur (et non par l'utilisateur) au cas où une personne malveillante s'introduirait sur les serveurs. La NSA a eu accès aux clés de déchiffrement des opérateurs – avec ou sans leur aide, difficile de le savoir –, elle avait alors accès aux données de tout le monde.

Les grands groupes ont compris qu'ils devaient s'extraire de la chaîne de chiffrement des données pour éviter une telle situation et ainsi améliorer la sécurité des données des utilisateurs. De fait, les dernières versions des iPhone et des téléphones Android permettent aux utilisateurs de chiffrer leurs données sur le téléphone avec une clé qu'Apple, par exemple, ne connaît pas.

Les autorités ne peuvent plus solliciter l'opérateur pour déchiffrer les données sur le téléphone. C'est une partie du problème qui opposait Apple et le FBI. Par ailleurs, les iPhone sont dotés d'un système qui efface toutes les données si le mot de passe est entré de façon erronée dix fois de suite, une option qui empêche le FBI de s'attaquer au téléphone sans risquer de perdre les données.

Apple, qui a coopéré par le passé avec les autorités dans des situations similaires, refuse aujourd'hui de fournir son aide. Le constructeur explique que le logiciel qui devrait être développé pour accéder aux données menace de façon générale la vie privée des utilisateurs d'appareils iPhone. L'enjeu de ce contentieux est celui des logiciels de

chiffrement munis d'une trappe, c'est-à-dire un accès utilisable par les autorités pour contourner le cryptage et accéder aux données.

PLS

La plupart des industriels soutiennent Apple. Une voix qui détonne est celle d'Adi Shamir. Quels sont ses arguments ?

D. P. : Selon Adi Shamir (le S dans RSA), Apple devrait collaborer dans ce cas précis. D'abord, le tueur étant mort et clairement coupable, sa vie privée n'est pas à défendre.

Il y a aussi un argument technique. Depuis la version 8 du système d'exploitation des téléphones Apple, les données sont chiffrées sur le terminal avec une clé inconnue d'Apple. Mais d'après Adi Shamir, Apple aurait les moyens de désactiver l'effacement après dix codes de déverrouillage erronés, rendant possible la recherche exhaustive

Dans le cas du téléphone du tueur de San Bernardino, le FBI a annoncé le 28 mars qu'il aurait débloqué le téléphone sans l'aide d'Apple. Néanmoins, la question fondamentale demeure. Il y aura certainement d'autres affaires avec des téléphones que le FBI ne saura pas décrypter et la question d'une trappe surgira de nouveau.

PLS

Quelles seraient les conséquences d'un système équipé d'une trappe ?

D. P. : Si l'Etat américain impose aux industriels de prévoir une trappe dans les systèmes de chiffrement, ce sera catastrophique. Tous les spécialistes de la cryptographie s'accordent à dire que c'est une très mauvaise solution. Une trappe est une faille volontairement installée dans le logiciel de chiffrement. Comment garantir qu'elle sera bien protégée de toute intrusion non

officielle ? Cette trappe serait évidemment munie d'une clé détenue par le FBI, mais comment cette agence assurera-t-elle que la clé ne tombe pas entre de mauvaises mains ?

Par ailleurs, une fois que les États-Unis auront imposé aux opérateurs la mise en place

d'une trappe, tous les autres gouvernements exigeront la même chose. Autant de risques de voir des fuites et de mauvaises utilisations de ces trappes. Cela ne menacera pas seulement les données des criminels, mais aussi la vie privée de tout le monde.

Une trappe est une faille voulue dans le logiciel de chiffrement, une catastrophe en termes de sécurité

des codes de déverrouillage sans endommager le contenu du téléphone. C'est cette dernière « trappe » qu'Adi Shamir souhaiterait qu'Apple n'ait plus les moyens d'utiliser. Apple ne pourrait alors plus aider le FBI.

Calculer avec des données chiffrées

I est théoriquement possible de demander à un tiers de traiter des données même si votre requête et les données sont chiffrées. Le chiffrement complètement homomorphe permet ce tour de force.

Les travaux dans ce domaine ont bien progressé.

Le principe est simple. Imaginons que vous chiffriez simplement vos données d_1, d_2, d_3 en les multipliant par une constante C (la clé de chiffrement). Vous envoyez les données chiffrées Cd_1, Cd_2 et Cd_3 sur le serveur tiers. Vous pouvez alors demander à l'opérateur d'effectuer certains calculs simples sur ces données, telle leur moyenne. Il suffit alors de diviser par C le résultat que l'opérateur vous renvoie pour obtenir la moyenne de vos données. Ce faisant, l'opérateur n'a pris connaissance ni des vraies données ni de leur moyenne.

Certaines demandes peuvent être effectuées

dans ces conditions, mais d'autres ne sont pas possibles sans révéler la clé de chiffrement.

Pour exécuter toutes sortes de calculs, le système de chiffrement doit être complètement homomorphe, c'est-à-dire qu'il doit présenter deux propriétés :

$$\mathcal{E}(d_1 + d_2) = \mathcal{E}(d_1) \oplus \mathcal{E}(d_2)$$

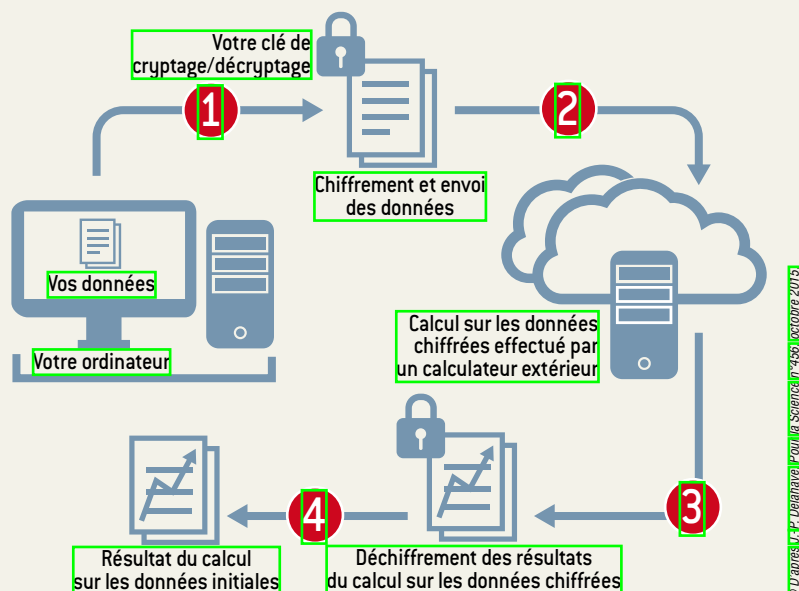
$$\text{et } \mathcal{E}(d_1 \times d_2) = \mathcal{E}(d_1) \otimes \mathcal{E}(d_2),$$

où $\mathcal{E}$ est l'opération de chiffrement, d_1 et d_2 deux données, $\oplus$ et $\otimes$ deux opérations propres au chiffrement. L'opérateur tiers exécute les opérations $\oplus$ et $\otimes$ sur les données chiffrées, ce qui revient à additionner ou multiplier les données initiales.

Avec ces deux propriétés, toutes les opérations logiques booléennes (ET, OU, etc.) sont définissables et il est possible d'effectuer toutes les manipulations désirées sur les données.

Le système RSA est homomorphe pour la multiplication, mais pas pour l'addition. En 2009, Craig Gentry a proposé le premier système complètement homomorphe. Celui-ci était impossible à mettre en pratique : les calculs à effectuer au moment du chiffrement et du déchiffrement étaient trop volumineux. Et la taille des données à manipuler par l'opérateur tiers était des millions de fois plus importante que celle des données avant chiffrement.

Les travaux récents ont permis de réduire le surcoût en taille des données et en lourdeur de calcul. Le système est déjà utilisable dans certains cas simples.



PLS

La recherche en cryptographie propose-t-elle des solutions alternatives ?

D. P. : Les systèmes tendent aujourd'hui vers un chiffrement de bout en bout par l'utilisateur. Ses données, sur le serveur d'un opérateur tel Google, seront alors chiffrées. L'utilisateur ne pourra plus utiliser les outils de l'opérateur pour effectuer des opérations sur ses données, telle une recherche par mots-clés. En effet, comment soumettre une requête à Google si celui-ci ne peut pas lire les données ? C'est théoriquement possible avec le « chiffrement complètement homomorphe », proposé en 2009 par Craig Gentry, un chercheur d'IBM. Et mieux, il est possible d'obtenir une réponse pertinente, que l'opérateur ne voit pas, à une question qu'il ne connaît pas ! Ainsi, avec une requête sur des données cryptées, Google pourra effectuer les opérations que vous lui demandez.

Cette méthode de chiffrement est un grand axe de recherche actuel (voir l'encadré ci-contre). Des progrès ont été réalisés pour réduire les temps de calcul. Par exemple, un calcul test par un système complètement homomorphe qui prenait plusieurs heures se fait maintenant en quelques secondes. On reste loin d'une mise en place à grande échelle, mais ce système sera la prochaine étape dans la sécurisation des données.

PLS

L'ordinateur quantique, s'il devient réalité, menacera-t-il les systèmes de cryptage ?

D. P. : Cette menace reste théorique, mais nous y réfléchissons déjà. L'ordinateur quantique exploite des propriétés de la physique quantique pour accroître les capacités de calcul. Ainsi, un algorithme adapté pourrait effectuer certaines opérations plus vite qu'avec un ordinateur classique. En particulier, nous avons déjà un algorithme quantique de factorisation. Le jour où un ordinateur quantique pourra l'utiliser, le système RSA sera obsolète. Nous étudions donc des systèmes de chiffrement classiques, dits postquantiques, dont le principe repose sur des problèmes difficiles que même les algorithmes quantiques ne peuvent résoudre efficacement – pour l'instant...

Propos recueillis par Sean BAILLY



La Biostatistique a son instrument

Stata fournit les outils statistiques, graphiques et de traitement de données nécessaires à toute recherche impliquant de la biostatistique.

- » Analyse de survie multi-niveaux
- » Estimateurs pour les données de panel
- » Calcul de puissance pour les tables de contingence
- » Méthodes de rééchantillonnage et de simulation
- » Imputation Multiple
- » Convient aux mesures longitudinales ou transversales



Programmable



Précis



Exhaustif

ritme.com/stata

+33 (0) 1 42 46 00 42

**Distributeur officiel en France,
Suisse, Belgique et Luxembourg**

RITME - 34 Bd Haussmann, 75009 Paris, France

RITME
SCIENTIFIC SOLUTIONS

STATA®

14
release

CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES par Gérald Bronner

Les classiques à la lumière des données massives

L'examen des recherches faites par les internautes offre un critère pour déterminer si un auteur est ou non un classique.



Qu'est-ce qui fait qu'un auteur est considéré comme un classique de la littérature ou de la philosophie ? La question est redoutable, car il est difficile d'identifier les mécanismes qui feront qu'une œuvre sera durablement remarquée. Rappelons le célèbre mot de saint Augustin sur la définition du temps : « Si personne ne m'interroge, je le sais ; si je veux répondre à cette demande, je l'ignore. » Il en va de même avec les classiques : nous savons bien ce qu'ils sont, mais nous ne sommes plus d'accord sur rien dès qu'il s'agit d'avancer vers une définition.

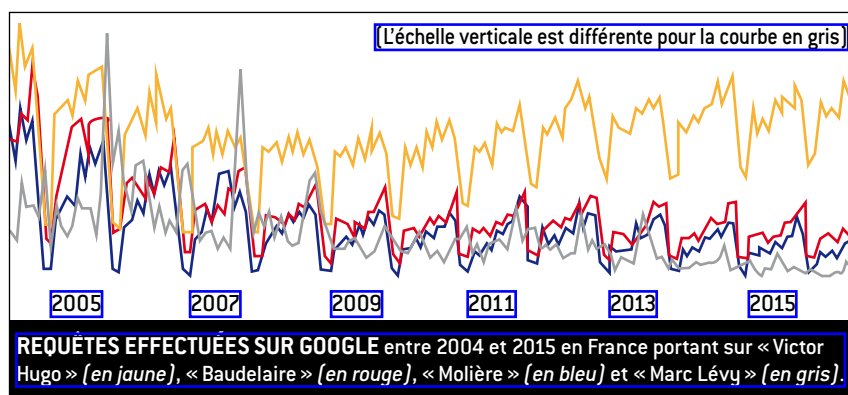
Je n'ai ainsi aucun doute sur le fait que Victor Hugo soit un classique et Marc Lévy non. Et je sais aussi que ce n'est pas parce que le premier est mort et le second encore vivant. On est donc tenté d'admettre une définition minimaliste : un auteur serait un classique parce qu'un certain nombre d'acteurs sociaux (universitaires, journalistes et commentateurs de toutes sortes) le considèrent comme tel. Dès lors, est-il possible d'identifier grâce aux données massives (ou *big data*) les conséquences de ce consensus social autour d'un auteur qui nous permettrait d'identifier sa présence au Panthéon des humanités au-delà de la seule impression que nous pouvons en avoir ?

Voyons justement comment se comporte l'algorithme Google Tendances, qui indique le volume de recherches menées par les internautes sur tel ou tel sujet durant une période donnée et dans un pays considéré. J'ai fait cette expérience pour « Marc Lévy ». La courbe de requêtes en France, entre 2004 et 2016, ne présente pas de régularité particulière. De

façon assez logique, ses pics correspondent à la sortie d'un nouveau livre avant l'été. En revanche, la structure de demande concernant les auteurs considérés comme classiques est au premier abord étrange et déconcertante. On aurait pu croire qu'être classique, c'est recueillir un volume de recherches constant et peu affecté par les événements.

auteur fait partie de la bibliographie scolaire, universitaire etc.) fortement influencée par un calendrier préétabli. C'est sans doute là le meilleur critère à retenir pour identifier méthodiquement les auteurs classiques.

A partir de là, on pourrait mettre en place un nouveau type d'études pour faire des comparaisons internationales : Molière



Il n'en est rien, comme l'indiquent les courbes associées à « Victor Hugo », « Molière » et « Baudelaire » (ci-dessus). Le volume de demande n'est pas le même pour chacun de ces auteurs, mais la structure de la demande est étonnamment semblable, avec un cycle identifiable à l'œil nu (avec des pics et des creux en phase).

Comment expliquer cette structure ? Le mystère n'est pas bien grand. Il suffit de remarquer que les creux correspondent systématiquement à la période juillet-août et les pics au reste de l'année. Ainsi, le consensus autour d'un auteur – ce qui permet de le qualifier de classique – se traduit en activité sociale (ledit

est-il aussi un classique en Chine ou en Allemagne ? On pourrait aussi identifier l'élévation au rang de classique de tel ou tel auteur durant une période donnée. La courbe de Marguerite Duras, par exemple, a une structure bien moins typique que celle de Gustave Flaubert. Ce critère me paraît bien plus fiable que l'introduction d'un auteur dans la collection de la Pléiade ou toute autre forme de reconnaissance sociale. L'agrégation des recherches collectives – plutôt que le Panthéon – est une forme solide de reconnaissance.

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



Abonnez-vous à

POUR LA
SCIENCE

Plus de
24%
de réduction

OFFRE LIBERTÉ

4,90€
PAR MOIS
SEULEMENT

BULLETIN D'ABONNEMENT

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

☒ **OUI**, je m'abonne à **Pour la Science** formule Découverte.
Je règle par prélèvement automatique de 4,90€ par mois et
je complète l'autorisation ci-contre. **J'économise 24% par mois.**
(IPV4E90)

MES COORDONNÉES

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____

Ville : _____

Tél. Pour le suivi client (facultatif) : _____

E-mail obligatoire : _____

@ _____

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

Délai de livraison: dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31/05/16 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site www.pourlascience.fr. Conformément à la loi "Informatique et libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à Pour la Science. Votre abonnement en prélèvement est reconduit automatiquement et peut être interrompu par simple lettre.

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

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____ Ville : _____

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque) : _____

IBAN

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

Établissement teneur du compte

Nom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____ Ville : _____

Date et signature

Organisme Créancier

Pour la Science - 8 rue Férou - 75006 Paris

N° ICS FR92ZZZ426900

N° de référence unique de mandat (RUM) : _____

Joindre un RIB

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

HOMO SAPIENS INFORMATICUS chronique de Gilles Doweck

Quel est le prix de notre anonymat ?

Les dossiers médicaux sont une source d'informations pour la recherche, mais il faut protéger l'identité des personnes.



Les hôpitaux, écoles, administrations, etc. accumulent des données qui sont, pour les chercheurs, une mine d'or. Par exemple, les données collectées au contact des malades par les médecins qui les soignent ont une énorme valeur pour les chercheurs en médecine. Mais diffuser des dossiers médicaux, même en direction de chercheurs, soulève des problèmes éthiques, en particulier parce que ces chercheurs, même s'ils ne les publient pas directement, publieront des informations qui en sont issues. Comment garantir que ces informations ne permettent pas, à une personne mal intentionnée, de remonter aux données initiales et d'en déduire l'état de santé d'une personne particulière ? Outre que cela constituerait une violation de son intimité, ces informations, utilisées par son employeur ou son assureur, pourraient nuire concrètement à cette personne.

Une solution simple est de demander à l'hôpital d'anonymiser ces dossiers, c'est-à-dire d'y supprimer le nom propre des patients, qui n'est pas utile aux chercheurs. Cette méthode est toutefois souvent qualifiée de « pseudo-anonymisation », car elle n'est pas très efficace.

Par exemple, supprimer le nom du compositeur Wolfgang Amadeus ***, né à Salzbourg le 27 janvier 1756 et mort à Vienne le 5 décembre 1791, n'empêche pas de l'identifier. Certes, tout le monde n'est pas aussi célèbre que l'auteur de *La Flûte enchantée*, mais une étude a montré que 87 % des personnes vivant aux États-Unis étaient identifiables par leur code postal, leur sexe et leur date de nais-

sance. La conjonction de ces trois valeurs constitue un « quasi-identificateur » – et il en existe bien d'autres. Ce résultat n'est, en fait, pas si surprenant, quand on prend conscience qu'il y a 6 milliards de combinaisons possibles pour ces valeurs et seulement 300 millions de personnes aux États-Unis. Or supprimer l'une de ces informations interdirait aux chercheurs de faire des statistiques sur



l'influence du lieu de résidence, du sexe ou de l'âge des patients, sur, par exemple, la fréquence d'une maladie.

Les chercheurs en informatique proposent aujourd'hui des procédures plus complexes de protection de la vie privée des patients, fondées sur une détérioration – appauvrissement ou bruitage – des données. Il existe de nombreuses manières de détériorer des données, par exemple ne garder que l'année de naissance des patients ou modifier leur date de naissance de quelques jours, afin de rendre leur identification plus difficile. La

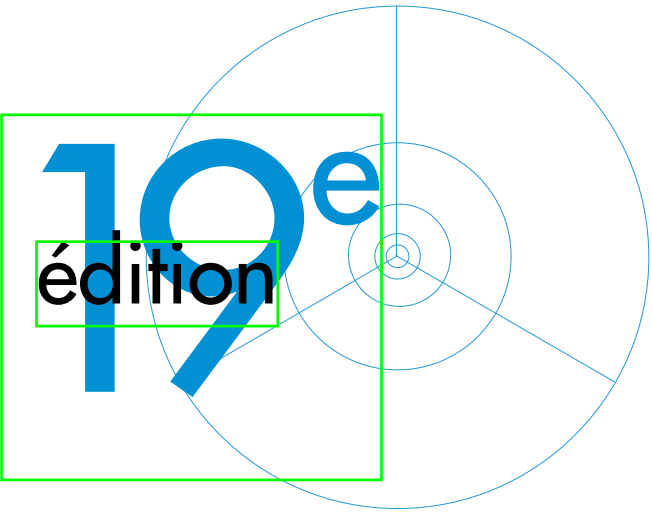
question qui se pose désormais est celle du bon degré de détérioration des données : il faut suffisamment les appauvrir ou les bruite pour rendre l'identification difficile, mais pas trop afin qu'elles gardent une pertinence.

Ce dilemme n'est en fait que le symptôme d'un autre, plus fondamental : dans l'état actuel de nos connaissances – qui peuvent certes encore progresser – nous ne savons pas garantir simultanément le parfait anonymat des patients et la meilleure efficacité de la recherche. Nous devons donc sacrifier une petite partie de l'un au profit de l'autre.

Quel compromis souhaitons-nous ? Naguère, les chercheurs avaient accès à très peu de données sur les patients. Le choix était donc fait, par l'état des techniques, en faveur de l'anonymat, au détriment de l'efficacité de la recherche. Mais aujourd'hui, du fait du développement des techniques de collecte des données, nous avons davantage le choix.

Continuer comme avant, ce qui reviendrait à interdire la communication des dossiers médicaux aux chercheurs, ou à les détériorer complètement, est possible. Mais ce compromis autrefois imposé par l'état des techniques n'est pas nécessairement celui que nous devons préférer. Nous pouvons aussi abandonner une petite partie de notre anonymat au profit d'une recherche plus efficace : il nous suffit, pour cela, de décider de moins détériorer les données. ■

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



19^e
édition

PRIX *Le Monde* DE LA RECHERCHE UNIVERSITAIRE

Le prix *Le Monde* de la recherche universitaire récompense des travaux de thèse remarquables pour leur impact sur notre environnement scientifique, économique et social

Le concours est présidé par **Edgar Morin**, sociologue et philosophe, pour les sciences humaines et sociales, et par **Cédric Villani**, mathématicien, pour les sciences dites « dures ».

En sciences humaines et sociales, trois docteurs seront primés et leurs travaux seront publiés aux Presses universitaires de France (PUF). Dans la catégorie des sciences « dures », cinq docteurs seront primés et leurs travaux seront publiés dans un ouvrage collectif aux éditions Le Pommier et dans le magazine *Pour la Science*.

Le Monde éditera également un cahier spécial à l'occasion de la cérémonie de remise des prix.

La Ligue de l'enseignement, en partenariat avec *Le Monde*, remettra un prix à l'auteur d'une thèse faisant appel à ses valeurs fondatrices : l'éducation, la laïcité et la citoyenneté.

LE PRIX *LE MONDE* DE LA RECHERCHE UNIVERSITAIRE

est ouvert aux docteurs francophones
de toutes disciplines ayant soutenu
leur thèse entre le 31 octobre 2014
et le 31 décembre 2015.

PLUS D'INFOS ET INSCRIPTIONS

www.lemonde.fr/prix-recherche/

Mail : prixrecherche@lemonde.fr

Les inscriptions seront enregistrées
jusqu'au mardi 31 mai 2016 inclus.

Le pivot copernicien

par Richard Taillet, sur le blog Signal sur bruit

On présente souvent Copernic comme un visionnaire qui aurait bouleversé notre vision du cosmos, en remplaçant une Terre centrale et immobile par une Terre en mouvement autour d'un Soleil central et fixe. Sans vouloir diminuer le rôle qu'a joué la publication du *De Revolutionibus* en 1543 dans l'évolution des sciences et de notre vision du cosmos, il est intéressant de revenir sur la façon dont cette œuvre s'inscrit dans l'astronomie médiévale.

Avant Copernic, c'est le point de vue ptoléméen qui fait autorité : la Terre est au centre de l'Univers, entourée d'une grande sphère céleste qui porte les étoiles et tourne sur elle-même. La Lune, le Soleil et des planètes tournent sur des cercles (épicycles) dont les centres tournent eux-mêmes sur des cercles (déférents), ces derniers n'étant pas exactement centrés sur la Terre (excentricité). L'un des apports de Ptolémée fut de proposer que certains cercles étaient décrits à une vitesse variable : ce n'est que vu depuis un point distinct du centre du cercle, l'équant, que le mouvement paraissait régulier. Plus de mille ans d'astronomie ont affiné cette vision sans la remettre en cause.

On sait peu de chose sur les motivations de Copernic, mais la plupart des historiens des sciences mettent en avant le désir de se débarrasser de cet équant qu'il jugeait abominable et de refonder l'astronomie sur des mouvements circulaires uniformes. En ce sens, cela ressemble davantage à un pas en arrière qu'à une révolution ! On tombe là sur un premier paradoxe : c'est la recherche de mouvements « parfaits » et non des causes physiques qui pousse Copernic à placer le Soleil près du centre de son système (et non au centre, pour reproduire l'excentricité de l'orbite terrestre) ... ce qui permettra à Kepler, quelques décennies plus



Le système solaire présenté par Copernic dans *De Revolutionibus* en 1543.

tard, de remplacer les orbites circulaires par des ellipses, ruinant ainsi la perfection géométrique revendiquée par Copernic.

Second paradoxe : il semble que les astronomes prénewtoniens s'intéressaient surtout à la description du mouvement des astres et non à leur cause physique. En réalité, Ptolémée avait considéré l'hypothèse que le mouvement apparent des étoiles puisse être dû à la rotation de la Terre et non à celle de la sphère céleste, avant de l'écarter sur la base d'une discussion physique (fausse). Ces arguments ont par la suite été contredits à plusieurs reprises, ce que rappelle Copernic. Toutefois, l'opposition entre ces modèles cosmologiques repose en partie sur un malentendu : il est vain de chercher à savoir qui, de la Terre ou du Soleil, est immobile, car l'immobilité est une notion relative. Ce concept de relativité sera mieux compris au siècle suivant, après Galilée.

D'un point de vue technique, le modèle de Copernic n'a pas franchement simplifié la description des mouvements célestes. Il comprenait au moins autant d'épicycles et de déférents que celui de Ptolémée, et les calculs proposés dans le *De Revolutionibus* sont complexes. Il faudra attendre que d'autres astronomes les simplifient et dressent des tables astronomiques pour que des éphémérides soient élaborées, dont le pouvoir prédictif ne surpasse que modestement ceux de Ptolémée (contrairement à celles établies après Kepler). En revanche, une avancée majeure du modèle de Copernic est l'ordre des planètes et la taille relative de leurs orbites, des quantités arbitraires dans la vision ptoléméenne. Cette propriété sera cruciale pour Kepler.

Un pied dans le Moyen Âge, un autre dans un futur dont il ne verra pas les promesses, Copernic a révolutionné l'astronomie sans révolutionner la physique : il a fourni un pivot sur lequel elle a pu basculer et se reconstruire. Il faudra attendre Kepler pour que cesse l'obsession du cercle, Galilée pour que germe l'idée de relativité du mouvement, puis Newton pour que les trajectoires des planètes soient étudiées en termes de forces de gravitation, et non de figures géométriques ayant tel ou tel mérite. C'est alors seulement que prend fin la science médiévale. ■



Richard TAILLET est professeur à l'université Savoie-Mont-Blanc et chercheur au Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique théorique (LAPTh). Il est l'auteur du blog Signal sur bruit (www.scilog.fr/signal-sur-bruit).



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

france culture C'EST POUR VOUS

LA MARCHÉ DES SCIENCES

DÉCOUVERTES INVENTIONS, AVENTURES SAVANTES AU FIL DE L'HISTOIRE

AURÉLIE LUNEAU
CHAQUE JEUDI
16H - 17H



en partenariat avec **POUR LA SCIENCE**

Écoute réécoute, podcast
franceculture.fr



Le GPS de notre cerveau

May-Britt Moser et Edvard Moser



Le sens de l'orientation n'est pas un mythe : notre cerveau est bien doté d'un système de localisation et de navigation hors pair. La découverte récente de ce GPS biologique a valu le prix Nobel aux époux Moser, qui nous décrivent ici ce système et son fonctionnement élaboré.

L'invention du GPS (*Global Positioning System*, c'est-à-dire « système de localisation global ») a entièrement transformé notre capacité à conduire une voiture, à piloter un avion ou même à parcourir à pied les rues de la ville. Mais comment naviguions-nous avant d'avoir un appareil GPS ? De récents travaux ont montré que le cerveau des mammifères est doté d'un système de navigation incroyablement élaboré, qui nous guide d'un endroit à un autre.

Comme le GPS de nos téléphones et de nos voitures, notre cerveau évalue où nous sommes et où nous allons en intégrant des signaux multiples concernant notre position et le temps qui s'écoule. Normalement, le cerveau effectue ces calculs avec un minimum d'effort, de sorte que nous en avons à peine conscience. C'est seulement lorsque nous sommes perdus ou lorsque notre aptitude à naviguer est dégradée par une lésion ou une maladie neurodégénérative que nous prenons conscience de l'importance de ce système de cartographie et de navigation pour notre existence.

La capacité de savoir où nous sommes et où nous devons aller est essentielle à notre survie. Sans elle, nous-mêmes, comme tous les autres animaux, serions incapables de trouver de la nourriture et de nous reproduire.

Le caractère perfectionné du système utilisé par les mammifères ressort lorsqu'on le compare à celui d'autres animaux. Le petit ver nématode *Caenorhabditis elegans*, muni de seulement 302 neurones, navigue presque exclusivement en réaction à des signaux olfactifs, en suivant une concentration d'odeur croissante ou décroissante spatialement (un gradient d'odeur).

Les animaux dotés de systèmes nerveux plus élaborés, telles les fourmis du désert ou les abeilles domestiques, trouvent leur chemin à l'aide de stratégies supplémentaires. L'une de ces dernières s'appelle l'intégration du trajet. C'est un mécanisme similaire à celui du GPS, au cours duquel les neurones déterminent la position sur la base d'un suivi continu de la direction et de la vitesse du déplacement de l'animal par rapport à un point de départ. Cette tâche est effectuée sans référence à des indices externes, tels que des points de repère physiques.

Chez les vertébrés, et en particulier chez les mammifères, le répertoire des comportements qui permettent à un animal

L'ESSENTIEL

■ **Savoir se localiser et s'orienter est une capacité essentielle à la survie d'un animal.**

■ **Plusieurs réseaux de cellules profondément enfouis dans le cerveau se conjuguent pour établir une carte mentale de l'environnement, constituant ainsi un système de localisation.**

■ **Les régions cérébrales intervenant dans l'orientation sont aussi intimement liées à la création de souvenirs.**

■ **Chez les patients atteints de la maladie d'Alzheimer, ces réseaux d'orientation sont souvent touchés.**

de se repérer dans son environnement est encore plus étendu.

Plus que toute autre classe d'animaux, les mammifères s'appuient sur leur capacité à former des cartes neurales de leur environnement. Il s'agit de profils d'activité électrique dans le cerveau, où des groupes de cellules nerveuses s'activent de façon à refléter l'agencement du milieu environnant et la position qu'y occupe l'animal. On présume que la formation de ces cartes mentales a lieu principalement dans le cortex, cet ensemble de couches supérieures du cerveau qui forment des replis sinueux et qui sont apparues très tardivement dans l'évolution.

Au cours des dernières décennies, les scientifiques ont acquis une connaissance approfondie de la façon dont le cerveau forme ces cartes et les révisé quand l'animal se déplace. Les récents travaux, menés principalement chez des rongeurs, ont révélé que les systèmes de navigation sont constitués de plusieurs types de cellules spécialisées, qui calculent en permanence la position de l'animal, la distance qu'il a parcourue, la direction dans laquelle il avance et sa vitesse. L'ensemble de ces différentes cellules élabore ainsi une carte dynamique de l'espace local, qui non seulement fonctionne au présent, mais peut également être mémorisée pour une utilisation ultérieure.

Les neurosciences de l'espace

L'étude des cartes spatiales du cerveau a commencé avec Edward Tolman, un professeur de psychologie de l'université de Californie à Berkeley, de 1918 à 1954. Auparavant, des expériences de laboratoire sur le rat semblaient indiquer que les animaux trouvent leur chemin en répondant à des stimuli successifs le long de leur trajet et en les mémorisant. En apprenant à parcourir un labyrinthe, par exemple, ils étaient supposés se souvenir des séquences de virages qu'ils avaient effectués entre le point de départ du labyrinthe et son arrivée. Cependant, on n'envisageait pas que les animaux puissent se faire une image globale de la totalité du labyrinthe pour être à même de prévoir le meilleur chemin.

Tolman a radicalement rompu avec les idées prévalant alors. Il a observé des rats prenant des raccourcis ou faisant des détours, des comportements qui seraient

LES AUTEURS



May-Britt MOSER et Edvard I. MOSER sont professeurs de psychologie et de neurosciences à l'université norvégienne de science et technologie, à Trondheim. Ils sont lauréats du prix Nobel de physiologie ou médecine pour 2014, partagé avec l'Américano-Britannique John O'Keefe.

peu probables s'ils n'avaient appris qu'une longue séquence de réponses motrices. Sur la base de ces observations, il émit l'hypothèse que les animaux établissent des cartes mentales qui reflètent la géométrie spatiale de leur environnement. Ces cartes cognitives fournissaient aux animaux plus qu'une aide pour trouver leur chemin; elles semblaient également enregistrer des informations relatives aux événements vécus par les animaux en des endroits précis.

Les idées de Tolman, avancées pour la première fois vers 1930, sont restées controversées des décennies durant. Elles n'ont été acceptées que peu à peu, en partie parce qu'elles reposaient entièrement sur l'observation du comportement d'animaux de laboratoire, lequel était interprétable de diverses façons. Tolman ne disposait pas des concepts ou des outils nécessaires pour vérifier s'il existait réellement une carte interne de l'environnement dans le cerveau d'un animal.

Il a fallu attendre près de quarante ans avant que des études de l'activité neurale apportent une preuve directe de l'existence d'une telle carte. Dans les années 1950, grâce aux progrès dans le développement de microélectrodes, il est devenu possible d'enregistrer l'activité électrique de neurones individuels chez des animaux en état d'éveil. Ces électrodes très fines ont permis aux chercheurs d'identifier la décharge de neurones individuels, pendant que les animaux vquaient à leurs occupations. Une cellule « décharge » lorsqu'elle déclenche un potentiel d'action, une brève modification de la tension électrique qui parcourt la membrane cellulaire du neurone. Des potentiels d'action provoquent la libération par les neurones de molécules de neurotransmetteurs, qui véhiculent les signaux d'un neurone à un autre.

John O'Keefe, de l'University College de Londres, a utilisé des microélectrodes pour mesurer chez des rats les potentiels d'action dans l'hippocampe, une région du cerveau connue depuis des décennies pour son importance dans les fonctions de mémorisation. En 1971, il annonça que des neurones s'y activaient lorsqu'un rat placé dans une boîte restait un certain temps en un endroit donné; il a donc nommé ces

neurones « cellules de lieu ». John O'Keefe a observé que différentes cellules de lieu s'activaient en différents endroits dans la boîte et que le schéma des cellules activées formait, collectivement, une carte des différents endroits de la boîte. On pouvait lire grâce aux électrodes l'activité combinée de nombreuses cellules de lieu et, ainsi, identifier l'endroit précis où se trouvait l'animal à un instant donné. En 1978, John O'Keefe et son collègue Lynn Nadel ont suggéré que les cellules de lieu faisaient en fait partie intégrante de la carte cognitive que Tolman avait envisagée.

Des positions codées dans l'hippocampe

La découverte des cellules de lieu a ouvert une fenêtre sur les parties les plus profondes du cortex, dans les régions les plus éloignées des cortex sensoriels (celles qui reçoivent les signaux des organes des sens) et du cortex moteur (qui émet les signaux déclenchant ou contrôlant le déplacement). À la fin des années 1960, lorsque John O'Keefe débutait ses travaux, la compréhension des instants auxquels les neurones étaient actifs ou inactifs se limitait aux cortex sensoriels primaires, régions du cerveau où l'activité neurale est contrôlée directement par des signaux sensoriels entrants tels que la lumière, le son et le toucher.

À l'époque, les neurobiologistes conjecturaient que l'hippocampe était trop éloigné des organes sensoriels pour traiter leurs informations de quelque manière qui pût être facilement comprise à partir d'un enregistrement par des microélectrodes. La découverte dans l'hippocampe de cellules créant une carte de l'environnement immédiat d'un animal a totalement démenti cette hypothèse.

Bien que la découverte fût remarquable et qu'elle suggérât que les cellules de lieu jouaient un rôle dans la navigation, personne ne savait quel pouvait être ce rôle, une ignorance qui a persisté des décennies. Les cellules de lieu se trouvaient dans une région de l'hippocampe nommée CA1, qui était le dernier relais d'un circuit commençant ailleurs dans l'hippocampe. On a émis l'hypothèse que les cellules de lieu recevaient un grand nombre des informations essentielles relatives à la navigation en provenance d'autres régions de l'hippocampe.

Au tournant du millénaire, nous avons tous deux décidé d'étudier plus en détail

cette idée dans le nouveau laboratoire que nous avons créé à l'université norvégienne des sciences et technologies, à Trondheim. Cette recherche nous a finalement conduits à une découverte majeure.

En collaboration avec Menno Witter et quelques étudiants astucieux, nous avons commencé par utiliser des microélectrodes pour suivre l'activité de cellules de lieu dans l'hippocampe de rats, après avoir perturbé une partie d'un circuit neuronal hippocampique, connu pour leur fournir des informations. Nous nous attendions à ce que cela confirme que ce circuit était important pour le bon fonctionnement des cellules de lieu. À notre grande surprise, les neurones terminaux de ce circuit, situés dans la région CA1, continuaient à décharger lorsque les animaux arrivaient en des endroits précis.

La conclusion inéluctable était que les cellules de lieu ne dépendaient pas de ce circuit hippocampique interne pour déterminer les positions d'un animal. Nous avons alors porté notre attention sur la seule voie neurale qui avait été épargnée par notre intervention : les connexions directes entre la région CA1 et le cortex entorhinal, une région contiguë qui sert d'interface avec le reste du cortex.

Des neurones actifs aux nœuds d'un réseau

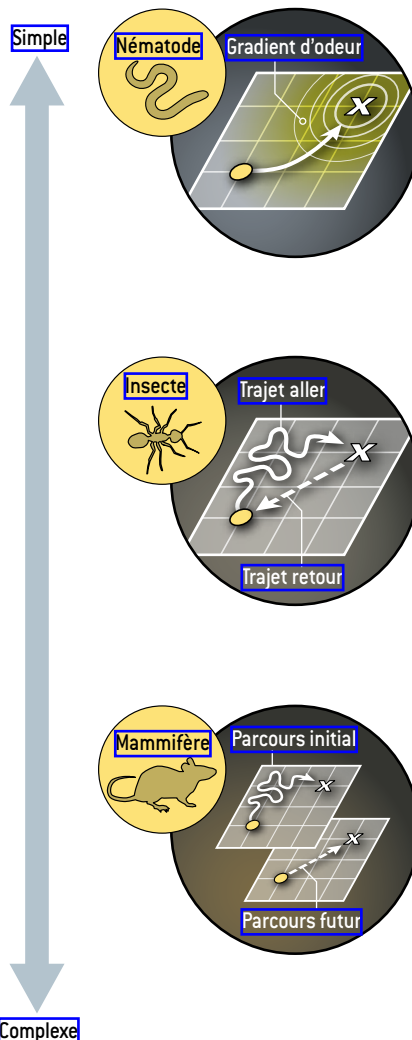
En 2002, nous avons inséré des microélectrodes dans le cortex entorhinal, toujours en collaboration avec Menno Witter, et nous avons procédé à l'enregistrement lorsque les animaux effectuaient des tâches similaires à celles que nous avons utilisées lors de nos études des cellules de lieu. Nous avons placé des électrodes dans une région du cortex entorhinal présentant des connexions directes avec les parties de l'hippocampe où des cellules de lieu avaient été enregistrées dans presque toutes les études antérieures aux nôtres.

Nous avons constaté que de nombreuses cellules du cortex entorhinal déchargeaient lorsqu'un animal se trouvait en un endroit particulier de l'enceinte, comme c'est le cas pour les cellules de lieu dans l'hippocampe. Toutefois, contrairement à une cellule de lieu, une cellule individuelle du cortex entorhinal déchargeait non seulement en un endroit visité par un rongeur, mais en de nombreux endroits.

La propriété la plus frappante de ces cellules était cependant la manière dont

COMMENT LES ANIMAUX S'ORIENTENT

Pour survivre, un animal, quelle que soit l'espèce à laquelle il appartient, doit être capable de tenir compte du milieu environnant et de déterminer, ne serait-ce que grossièrement, à quel endroit il se trouve et où il doit aller. L'évolution a fait apparaître chez certaines espèces des systèmes dits d'intégration du trajet, qui permettent à l'animal d'effectuer cette tâche sans avoir besoin de localiser l'endroit où il se trouve par rapport à des repères externes. Les mammifères ont trouvé une solution encore plus élaborée, qui met en jeu des cartes mentales internalisées.



En suivant une odeur

Le petit ver nématode *Caenorhabditis elegans* présente peut-être le système de navigation animal le plus rudimentaire. Son monde est organisé en fonction des odeurs. Équipé de seulement 302 neurones, ce ver avance droit devant lui vers une source de nourriture en suivant une odeur dont l'intensité augmente.

Un GPS interne

L'évolution a même équipé certains insectes de capacités de navigation élaborées. Ils peuvent déterminer de façon interne leur vitesse et la direction par rapport à un point de départ. Cela leur permet de trouver un itinéraire plus efficace, par exemple un retour en ligne droite au lieu des zigzags effectués à l'aller.

Des cartes mentales

Les mammifères ont acquis au fil de l'évolution des capacités d'orientation encore plus complexes. Leur système de localisation fait intervenir la décharge de neurones cérébraux par séquences reflétant les trajectoires suivies. Ces neurones élaborent ainsi des cartes mentales du monde physique. Les animaux mémorisent des trajets et utilisent ces souvenirs pour planifier leurs déplacements.

elles déchargeaient. Leur profil d'activité n'est devenu évident à nos yeux qu'en 2005, lorsque nous avons agrandi l'enceinte de l'expérience. Nous avons alors trouvé que les divers endroits où une cellule entorhinal déchargeait formaient les nœuds d'un réseau d'hexagones (plus précisément, un réseau triangulaire dessinant des hexagones). Autrement dit, lorsque l'animal passait par l'un des points du réseau, la

cellule, que nous avons nommée cellule de grille, déchargeait.

Les hexagones, qui recouvraient la totalité de l'enceinte, constituaient les unités individuelles d'un réseau ou d'une grille, un peu comme le réseau de carrés formé par les lignes de coordonnées sur une carte routière. Le profil de décharge suggérait que les cellules de grille, à la différence des cellules de lieu, fournissent

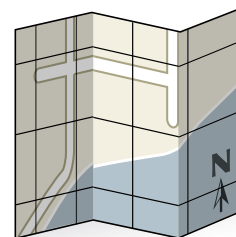
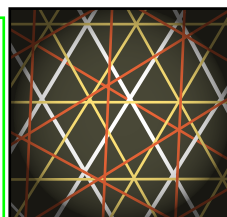
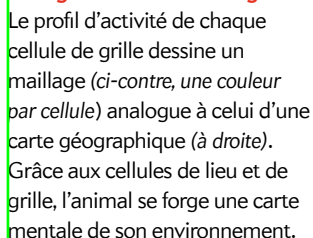
Plusieurs aspects de la grille changeaient également quand nous examinions l'activité des cellules dans différentes parties du cortex entorhinal. Dans la partie dorsale, près du sommet de cette structure, les cellules avaient un profil d'activité correspondant à une grille de l'enceinte formée d'hexagones peu espacés. La taille des hexagones (ou le pas du réseau) augmentait par étapes successives – ou modules – à mesure qu'on allait vers la partie inférieure ou ventrale du cortex entorhinal. Dans chaque module, les éléments hexagonaux de la grille présentaient un espacement propre.

On pouvait déterminer le pas du réseau dans les modules successifs, de haut en bas, en multipliant le pas du réseau correspondant au module précédent par un facteur d'environ 1,4, soit à peu près la racine carrée de 2. Un rat dont s'activait une cellule de grille du module situé au sommet du cortex entorhinal, lorsque l'animal se trouvait à l'un des nœuds du réseau, devait parcourir 30 à 35 centimètres jusqu'au nœud voisin. Dans le module suivant, le rat devait parcourir 42 à 49 centimètres. Et ainsi de suite. Dans le module le plus bas, la distance entre deux nœuds successifs du réseau d'hexagones atteignait plusieurs mètres de longueur.

Vers le milieu des années 1980 et au début des années 1990, James Ranck, du centre médical Downstate de New York, et Jeffrey Taube, aujourd'hui au Dartmouth

Nos études ont montré que ces cellules étaient aussi présentes dans le cortex entorhinal, mélangées à des cellules de grille. Beaucoup d'entre elles fonctionnaient aussi comme des cellules de grille : les endroits

L'idée que le cerveau des mammifères forge une carte mentale qui reflète la géométrie spatiale du milieu où se trouve l'animal a été proposée vers 1930. Les neurobiologistes ont par la suite identifié des réseaux de cellules qui fonctionnent de concert pour dresser ces cartes. Une avancée majeure a eu lieu en 1978, quand John O'Keefe a découvert que des « cellules de lieu » dans l'hippocampe du rat s'activent lorsque l'animal se trouve en certains endroits particuliers. En 2005, les auteurs (May-Britt et Edvard Moser) ont découvert des cellules de grille, qui permettent à l'animal de déterminer l'endroit où il se trouve, disons par rapport aux murs d'une enceinte. Chaque cellule de grille décharge en plusieurs endroits qui correspondent à des sommets d'hexagones.



de l'enceinte où elles déchargeaient formaient eux aussi une grille, mais ces cellules ne s'y activaient que lorsque le rat était face à une direction donnée. Ces cellules semblaient servir de boussole à l'animal ; leur suivi permettait de lire la direction, par rapport au milieu environnant, à laquelle l'animal faisait face à n'importe quel moment.

Quelques années plus tard,

en 2008, nous avons découvert un autre type de cellules dans le cortex entorhinal. Ces « cellules de bordure » déchargeaient chaque fois que l'animal s'approchait d'un mur, d'un bord de l'enceinte ou d'une quelconque cloison. Ces cellules semblaient calculer à quelle distance d'une frontière se trouvait l'animal. Cette information pourrait être utilisée par des cellules de grille pour estimer de combien l'animal s'est éloigné du mur et pourrait aussi faire office de point de référence pour rappeler par la suite au rat où se trouvent les murs.

Enfin, en 2015, des cellules du cortex entorhinal d'un quatrième type sont entrées en scène. Elles réagissent spécifiquement à la vitesse de déplacement de l'animal, indépendamment de sa position ou de sa direction. Les rythmes de décharge de ces neurones augmentent proportionnellement à la vitesse de déplacement. Nous pouvions en effet établir à quelle vitesse se déplaçait un animal à un instant donné en observant les fréquences de décharge d'un tout petit nombre de « cellules de vitesse ». En combinaison avec les cellules de direction de la tête, les cellules de vitesse fourniraient ainsi aux cellules de grille des informations mises à jour en permanence sur le déplacement de l'animal (sa vitesse, sa direction et la distance qui le sépare de son point de départ).

Des cellules de grille aux cellules de lieu

Si nous avons découvert les cellules de grille, c'est parce que nous souhaitions mettre au jour les signaux qui permettent aux cellules de lieu de fournir aux mammifères une image interne de leur environnement. Nous savons désormais que, quand le cerveau tente de déterminer le trajet emprunté, les cellules de lieu intègrent

Au moins quatre types de cellules interviennent dans le système d'orientation

■ SUR LE WEB

Vidéo montrant l'activité d'une cellule de grille du cortex entorhinal et qui finit par dessiner un motif hexagonal : <https://www.youtube.com/watch?v=i9GiLBXWAHI>

les signaux provenant de différents types de cellules présentes dans le cortex entorhinal. Cependant, même ces processus ne nous apprennent pas tout sur la façon dont s'orientent les mammifères.

Initialement, nos travaux ont porté sur la partie centrale et médiane du cortex entorhinal. Les cellules de lieu peuvent aussi recevoir des signaux du cortex entorhinal latéral, qui relaie des données provenant de plusieurs systèmes sensoriels, notamment des informations relatives à l'odeur et à l'identité des objets. En intégrant les données en provenance des parties médianes et latérales du cortex entorhinal, les cellules de lieu interprètent les signaux venant de l'ensemble du cerveau.

L'interaction complexe des signaux arrivant dans l'hippocampe et la création de souvenirs spécifiques des lieux qui s'ensuit est encore en cours d'étude par notre équipe et d'autres, et ces recherches dureront sans doute de nombreuses années.

Des cartes changeantes

L'une des façons de commencer à comprendre comment les cartes spatiales associées au cortex entorhinal médian et à l'hippocampe se combinent pour aider l'animal à s'orienter est de se demander quelles sont les différences entre les cartes. John Kubie et Robert Muller, au centre médical Downstate, ont montré dans les années 1980 que les cartes établies par les cellules de lieu de l'hippocampe changent totalement quand l'animal se retrouve dans un nouvel environnement, même lorsque celui-ci ne diffère du précédent que par la couleur.

Des expériences ont été réalisées dans notre laboratoire avec des rats qui parcouraient jusqu'à onze enceintes dans une série de pièces différentes. Elles ont montré qu'en fait, chaque pièce engendre rapidement sa propre carte indépendante, étayant ainsi l'idée selon laquelle l'hippocampe forme des cartes spatiales faites sur mesure en fonction de l'environnement.

En revanche, les cartes forgées par le cortex entorhinal médian sont universelles. Les cellules de grille qui déchargent ensemble en un groupe particulier d'endroits, déchargent aussi en des positions

Le système

de navigation

est couplé à la mémoire
et associe des souvenirs
aux lieux visités par
l'animal

analogues sur la carte d'un autre environnement, comme si les lignes de latitude et de longitude de la première carte étaient transférées sur le nouveau décor.

Il en est de même pour les cellules de bordures et celle de direction de la tête. Par exemple, la séquence de cellules qui se sont activées quand l'animal s'est dirigé vers le nord-est dans l'une des pièces de la cage se répète lorsque le rat avance dans cette même direction dans l'autre pièce. Le profil d'activité des cellules du cortex entorhinal est l'élément que le cerveau utilise pour naviguer dans les différents environnements.

Ces codes sont ensuite transmis du cortex entorhinal à l'hippocampe, où ils sont utilisés pour établir des cartes spécifiques d'un endroit donné. Du point de vue de l'évolution, l'élaboration de deux ensembles de cartes qui intègrent leurs informations pour guider les animaux semble constituer une solution économique pour un système d'orientation spatiale. Les réseaux que construit le cortex entorhinal médian pour mesurer la distance et la direction ne changent pas d'une pièce à l'autre. En revanche, les cellules de lieu de l'hippocampe créent des cartes particulières à chacune des pièces.

Plusieurs cartes locales

La compréhension du système neural de navigation reste un chantier ouvert. Presque toutes nos connaissances sur les cellules de lieu et de grille ont été acquises au moyen d'expériences où l'on enregistre l'activité électrique des neurones quand l'animal se déplace au hasard dans des environnements très artificiels, tels que des boîtes à fond plat et dépourvues de structures internes pouvant servir de points de repère.

Un tel environnement de laboratoire diffère considérablement des environnements naturels, qui changent en permanence et contiennent de nombreux objets tridimensionnels. Les cellules de lieu et les cellules de grille déchargent-elles de la même façon quand les animaux se trouvent dans le milieu naturel ?

Des expériences réalisées avec des labyrinthes complexes qui tentent d'imiter l'habitat naturel des animaux fournissent quelques indices. En 2009, nous avons enregistré le comportement de cellules de grille pendant que des animaux se déplaçaient dans un tel labyrinthe, où ils rencontraient un virage en épingle à cheveux à la fin de chaque allée, qui marquait le début du couloir suivant. L'étude a montré, comme prévu, que les endroits du labyrinthe où s'activaient les cellules de grille formaient des réseaux d'hexagones permettant de baliser le parcours dans une allée du labyrinthe. Mais chaque fois qu'un animal tournait pour emprunter l'allée suivante, une transition brutale avait lieu. Un motif de grille distinct se surimposait alors sur la nouvelle allée, presque comme si le rat entrait dans une pièce totalement différente.

Des travaux ultérieurs menés dans notre laboratoire ont montré que les cartes de grille se subdivisent également en cartes plus petites dans des environnements ouverts, si ces espaces sont suffisamment grands. Nous cherchons maintenant à comprendre comment ces cartes plus petites fusionnent pour former une carte intégrée d'une zone donnée.

Même ces expériences sont trop simplifiées, car les enceintes sont plates et horizontales. Des expériences réalisées dans

d'autres laboratoires, consistant à observer des chauves-souris en vol et des rats qui grimpent en divers endroits de leur cage, commencent à fournir quelques indices : les cellules de lieu et les cellules de direction de la tête semblent décharger en des endroits particuliers dans tout espace tridimensionnel, et il est très probable que les cellules de grille en fassent autant.

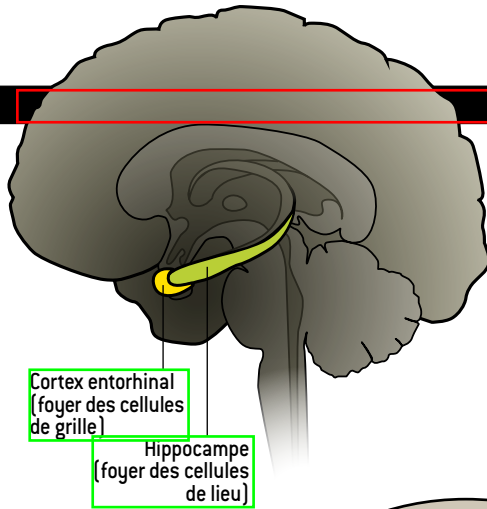
Le système de navigation de l'hippocampe apporte aux animaux bien plus qu'une simple aide pour aller d'un point A à un point B. Outre la réception de données sur la position, la distance et la direction envoyées par le cortex entorhinal médian, l'hippocampe enregistre ce qu'il y a en un endroit donné ainsi que les événements qui y surviennent. La carte spatiale créée par les cellules de lieu ne contient donc pas seulement des informations de positions, mais aussi des détails sur le vécu de l'animal à ces endroits, comme dans la conception de Tolman d'une carte cognitive.

Certaines de ces informations supplémentaires semblent provenir de neurones situés dans la partie latérale du cortex entorhinal. Des informations sur les objets fusionnent avec les positions de l'animal et sont mémorisées. Ce couplage entre lieu et mémoire rappelle une stratégie de mémorisation inventée par les Grecs et les Romains de l'Antiquité. La « méthode des *loci* » permet à une personne de mémoriser une liste d'objets en s'imaginant déposer chaque objet en un endroit précis le long d'un trajet bien connu dans un certain lieu, par exemple un paysage ou un bâtiment, ce qu'on appelle souvent un « palais de la mémoire ». Les participants à des concours de mémoire utilisent encore cette technique pour se souvenir de longues listes de nombres, lettres ou cartes à jouer.

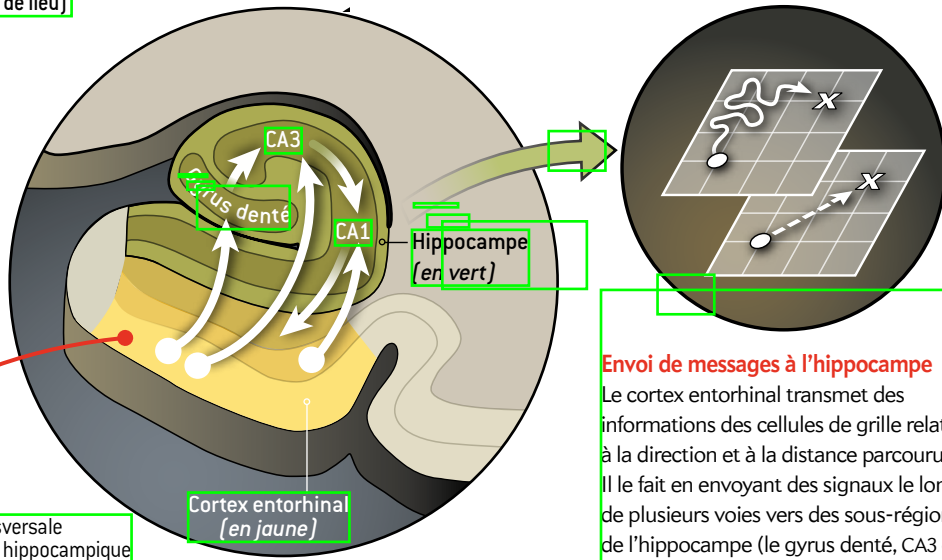
Quand le cortex entorhinal décline

Le cortex entorhinal figure malheureusement parmi les premières régions à décliner chez les personnes souffrant de la maladie d'Alzheimer. La maladie y provoque la mort de cellules cérébrales et une réduction de sa taille est considérée comme un critère fiable d'identification des sujets à risque. La tendance à errer et à se perdre

PLONGÉE À L'INTÉRIEUR DU GPS CÉRÉBRAL



Le système neural de navigation spatiale du cerveau humain est localisé dans les profondeurs d'une région nommée lobe temporal médian. Deux sous-régions, le cortex entorhinal et l'hippocampe, constituent des composantes clés du GPS cérébral. Dans le cortex entorhinal, des réseaux de plusieurs types de cellules spécialisées contribuent à la complexité du système de localisation des mammifères.

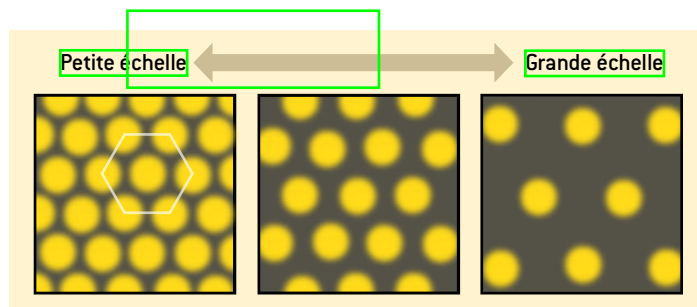


Envoi de messages à l'hippocampe

Le cortex entorhinal transmet des informations des cellules de grille relatives à la direction et à la distance parcourue. Il le fait en envoyant des signaux le long de plusieurs voies vers des sous-régions de l'hippocampe (le gyrus denté, CA3 et CA1), qui créent une carte mentale optimisée pour prévoir de futurs trajets.

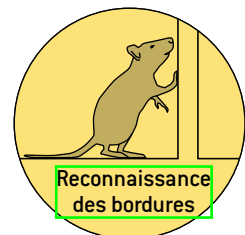
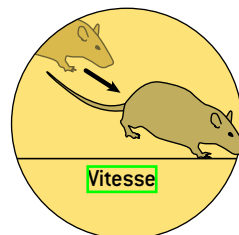
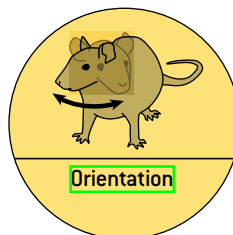
Chaque cellule de grille s'active quand...

... la position de l'animal correspond à l'un des nœuds d'un réseau dessiné par des hexagones. Le pas du réseau change entre le haut et le bas du cortex entorhinal. Un pas plus grand correspond à une distance plus longue que doit parcourir le rat entre deux activations de la cellule de grille. Dans le haut du cortex entorhinal, une cellule de grille s'active à nouveau lorsque le rat a parcouru 30 à 35 centimètres pour atteindre un nœud voisin. Dans le bas du cortex entorhinal, deux activations successives correspondent à un pas de plusieurs mètres.



D'autres cellules spécialisées récemment découvertes...

... dans le cortex entorhinal de rongeurs véhiculent des informations vers l'hippocampe, sur l'orientation de la tête de l'animal, sa vitesse de déplacement et la distance jusqu'aux murs et d'autres obstacles rencontrés. L'hippocampe intègre alors toutes ces données pour créer une carte composite de l'environnement de l'animal.



Cellules de grille : l'espace... et le temps aussi

Les cellules de grille s'activent lorsque la position de l'animal coïncide avec l'un des nœuds d'un réseau périodique constitué d'hexagones. De ce fait, elles jouent un rôle clé dans l'orientation spatiale de l'animal. Une étude publiée en novembre 2015 par Benjamin Kraus et ses collègues, à l'université de Boston, montre que les cellules de grille sont aussi fortement impliquées dans l'intégration des informations temporelles.

Ces chercheurs ont enregistré sur des rats l'activité de cellules de grille pendant que les rongeurs parcouraient un petit labyrinthe simple en forme de 8, où l'un des tronçons était un tapis roulant sur lequel les animaux couraient en faisant du sur-

place. Le tapis roulant, de vitesse réglable, fonctionnait pendant une durée fixe (16 secondes) ou roulait pendant une durée telle que la distance parcourue soit fixe (70 mètres). Les enregistrements au cours de différentes sessions expérimentales ont montré

que, lorsque les rats se trouvaient sur le tapis roulant, la quasi-totalité des cellules de grille présentaient un rythme élevé de décharge soit à des instants particuliers, soit pour certaines valeurs de la distance parcourue sur le tapis roulant. Le parcours des rats sur le tapis roulant se déroulant dans un cadre visuel constant, Benjamin Kraus et ses collègues concluent que les cellules de grille fournissent une représentation du temps écoulé et de la distance parcourue qui est indépendante des repères externes dont l'animal peut disposer.

figure aussi parmi les premiers indicateurs de la maladie.

Aux stades plus avancés de la maladie d'Alzheimer, des cellules de l'hippocampe meurent, ce qui conduit à une incapacité à se souvenir d'expériences vécues ou de concepts tels que les noms des couleurs. En fait, une étude récente a apporté des preuves que même des personnes jeunes portant un gène qui leur fait courir un risque élevé de développer la maladie d'Alzheimer présentent parfois des défauts de fonctionnement de leurs réseaux de cellules de grille, une découverte susceptible d'inspirer de nouvelles méthodes pour diagnostiquer la maladie.

Aujourd'hui, plus de quatre-vingts ans après que Tolman a proposé pour la première fois l'existence d'une carte mentale de notre environnement, il est clair que les cellules de lieu ne sont que l'une des composantes d'une représentation complexe que le cerveau se fait de son environnement spatial pour calculer la position, la distance, la vitesse et la direction. Les nombreux types cellulaires découverts dans le système d'orientation et de navigation du cerveau de rongeurs sont également présents chez les chauves-souris, les singes et les êtres humains. Leur existence dans plusieurs ordres taxinomiques de mammifères suggère que les cellules de grille et d'autres intervenant

dans la navigation sont apparues tôt au cours de l'évolution des mammifères et que des processus neuraux similaires servent à l'orientation chez de nombreuses espèces.

Bon nombre des éléments constituant la carte conjecturée par Tolman ont été découverts et nous commençons à comprendre comment le cerveau les crée et les déploie. La représentation spatiale est devenue l'un des circuits les mieux connus du cortex des mammifères et les algorithmes sous-jacents sont en cours d'identification, ce qui aidera à déchiffrer les codes neuraux que le cerveau utilise pour l'orientation et la navigation.

Des cartes géantes pour les migrants ?

Comme dans beaucoup d'autres domaines de la science, de nouveaux résultats soulèvent de nouvelles questions. Nous savons désormais que le cerveau dispose d'une carte interne, mais il nous reste à mieux comprendre comment les éléments de la carte fonctionnent de concert pour produire une représentation cohérente de la localisation et comment les informations sont lues par d'autres systèmes du cerveau pour prendre des décisions quant au lieu de destination et à la manière de s'y rendre.

De nombreuses autres questions se posent. Le réseau spatial associé à l'hippocampe et au cortex entorhinal est-il limité à la navigation dans l'espace local ? Avec les rongeurs, nous examinons des zones qui ne font que quelques mètres de rayon. Les cellules de lieu et de grille servent-elles également aux déplacements sur de longues distances, comme lorsque les chauves-souris migrent sur des centaines ou milliers de kilomètres ?

Enfin, nous nous demandons comment les cellules de grille se forment, s'il existe une période critique de formation pour les cellules de grille au cours du développement d'un animal et s'il existe des cellules de lieu et de grille chez d'autres animaux vertébrés ou invertébrés. Si les invertébrés sont aussi équipés de ces cellules, cela impliquerait que l'évolution a créé ce système de cartographie spatiale il y a des centaines de millions d'années. Le système de localisation et d'orientation dont est doté le cerveau continuera à produire une mine précieuse de sujets pour de nouvelles recherches, qui occuperont des générations de scientifiques dans les décennies à venir. ■

BIBLIOGRAPHIE

B. J. Kraus *et al.*, During running in place, grid cells integrate elapsed time and distance run, *Neuron*, vol. 88, pp. 578-589, 2015.

E. I. Moser *et al.*, Grid cells and cortical representation, *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 15 (7), pp. 466-481, 2014.

E. I. Moser, Grid cells and the entorhinal map of space, conférence de réception du prix Nobel, 7 décembre 2014 (<http://bit.ly/1WPRGPa>).

M.-B. Moser, Grid cells, place cells and memory, conférence de réception du prix Nobel, 7 décembre 2014 (<http://bit.ly/1wBRVvt>).

DOSSIER

POUR LA

SCIENCE

GÉOMÉTRIE

Triangle, rectangle, cercle... Ils n'ont pas livré tous leurs secrets.

FRACTALES

À quoi ressemblent-elles ?
transformé en un tore
toutes les longueurs sont
conservées ?

Actuellement
en kiosque

DOSSIER POUR LA SCIENCE - MATHÉMATIQUES - GÉOMÉTRIE - DESIGN - MORPHOGENÈSE - FRACTALES

Quand les MATHS prennent formes

Formes
élémentaires

Fractales

Naissance
des formes

AVANT-PROPOS
DE **CÉDRIC
VILLANI**



N° 91 Avril-Juin 2016

pouirlascience.fr

N° 91 - 120 pages - prix de vente : 7,50 €

www.pouirlascience.fr

Le site de référence de l'actualité scientifique internationale

LES MULTIPLES VISAGES DE LA MATIÈRE NOIRE

Bogdan Dobrescu et Don Lincoln

Pourquoi n'a-t-on toujours pas détecté la matière noire, censée être majoritaire dans l'Univers ? Parce qu'elle n'existe pas ? Ou parce qu'elle est bien plus complexe qu'on ne le pensait, comme le proposent de nouveaux modèles ?

LA GALAXIE D'ANDROMÈDE, comme la plupart des galaxies spirales, tourne trop vite sur elle-même pour que la force gravitationnelle due à sa matière visible assure sa cohésion. Pour expliquer cette rotation rapide, les physiciens supposent que la galaxie est pimbée d'un halo sphérique de matière noire, une substance abondante dans l'Univers mais qui échappe à toute détection directe.

L'ESSENTIEL

- Les physiciens pensent que l'Univers contient de grandes quantités de matière noire.
- La recherche de matière noire s'est fondée sur des modèles à un seul type de particules, mais celles-ci restent indétectées.
- La matière noire pourrait contenir plusieurs types de particules interagissant à peine avec la matière ordinaire, ce qui expliquerait l'absence de détection.
- Dans certains scénarios, la matière noire formerait par exemple des « atomes », ou un disque à l'échelle de la galaxie.

La galaxie d'Andromède, notre voisine céleste, recèle un mystère. Elle tourne trop vite sur elle-même pour que les lois connues de la physique en maintiennent la cohésion. La gravité engendrée par la matière visible de la galaxie est trop faible pour retenir les étoiles à sa périphérie qui, filant à toute vitesse, devraient être projetées hors de la galaxie. Si la matière existante se résumait à la matière visible, Andromède, comme presque toutes les galaxies spirales, ne devrait tout simplement pas exister.

Les cosmologistes pensent qu'un type de matière invisible – de la « matière noire » – entoure et imprègne Andromède et les autres galaxies, apportant le supplément de force gravitationnelle nécessaire pour en maintenir la cohésion. Cette matière noire représenterait plus de 80 % de la matière contenue dans l'Univers.

Dans les théories les plus simples, la matière noire est composée d'un unique type de particules, qui reste à identifier. Mais en dépit de décennies de recherche, personne n'a pu obtenir de preuve directe de l'existence de la matière noire. De plus, quelques désaccords subsistent entre les observations astronomiques et cette théorie simple. Combinés, ces désaccords résiduels et l'échec de la détection de cette substance insaisissable amènent certains scientifiques à remettre en cause la piste d'un seul type de matière noire. En effet, l'absence de détection est une information en soi, dont on déduit des limites sur certaines propriétés de la matière noire. Par exemple, l'absence de signal permet de calculer une limite supérieure à la probabilité d'interaction de la matière noire avec la matière ordinaire. Ces limites sont de plus en plus sévères et d'autant moins compatibles avec un modèle de matière noire à un seul type de particules.

Certains physiciens explorent des scénarios qui se dispensent de matière noire. Par exemple, ils étudient des théories où les lois de la gravitation sont modifiées et dont le comportement s'écarte de la mécanique newtonienne pour des accélérations extrêmement faibles (et non testées en laboratoire), comme dans les régions périphériques des galaxies. Cette approche reproduit de façon satisfaisante la rotation des galaxies spirales. Mais elle a ses défauts et requiert, par exemple, l'ajout de matière invisible pour décrire la dynamique des amas de galaxies.

De nombreux physiciens restent convaincus par l'hypothèse de la matière noire car

elle explique une grande variété d'observations astronomiques et cosmologiques : le mouvement des galaxies au sein des amas galactiques, la distribution de la matière à l'échelle de l'Univers, la dynamique de la matière lors d'une collision de deux amas ou le phénomène de lentilles gravitationnelles (l'amplification de la lumière émise par une source lointaine grâce à la déformation de l'espace-temps par la présence d'un objet massif dans la ligne de vue).

Dès lors, si l'hypothèse de la matière noire semble fondée, mais que le scénario à un seul type de particules n'est pas satisfaisant, il faut envisager que la matière noire puisse être plus complexe. Après tout, la matière ordinaire se présente bien sous de nombreuses formes – peut-être la matière noire est-elle tout aussi riche.

Ces dernières années, des physiciens ont envisagé cette possibilité. Cela pourrait s'accompagner d'un nouveau type de forces jusque-là insoupçonnées, agissant fortement sur la matière noire et très faiblement (ou pas du tout) sur la matière ordinaire. Des observations récentes de collisions de galaxies apportent peut-être un soutien préliminaire à cette hypothèse. De tels modèles expliqueraient de façon plus naturelle l'absence de signaux de la matière noire dans les différentes expériences actuelles et proposent des solutions à certaines difficultés théoriques posées par les modèles simples. Si la matière noire complexe existe, l'Univers est alors encore plus riche et fascinant que ne l'imaginaient les cosmologistes.

La part cachée de l'Univers

Bien que nous ne sachions pas encore de quoi est constituée la matière noire, nous en déduisons certaines propriétés grâce à son influence sur la matière ordinaire, par des observations ou des simulations numériques. Par exemple, les particules qui composent la matière noire sont probablement assez lourdes. Des particules de matière noire légères fileraient à une vitesse proche de celle de la lumière et ne se seraient pas accumulées dans des régions de l'Univers primordial qui sont à l'origine des grandes structures observées aujourd'hui.

Parce qu'elles n'absorbent pas de rayonnement électromagnétique et n'en émettent pas, elles doivent être électriquement neutres. Elles ne sont pas non plus

sensibles à l'interaction forte, qui assure la cohésion des noyaux atomiques ; si cela avait été le cas, nous en aurions vu des signes dans l'interaction de la matière noire avec les particules chargées de haute énergie que sont les rayons cosmiques. La matière noire pourrait cependant interagir avec la matière ordinaire *via* l'interaction faible, mais les expériences montrent que si de telles interactions sont possibles, elles sont extrêmement rares.

Nous savons aussi que la matière noire est stable aux échelles de temps cosmiques : elle ne se désintègre pas. En effet, la totalité de la matière noire a été produite dans les premiers instants du Big Bang, car nous ne connaissons pas de mécanisme qui aurait pu en produire en grande quantité depuis cette époque. Or, en principe, une particule massive se désintègre plus ou moins vite en particules plus légères. Si elle ne le fait pas, c'est qu'une certaine grandeur associée à cette particule doit être « conservée » (elle ne peut pas varier).

Illustrons ce principe avec l'électron. Il est électriquement chargé, et les seules particules plus légères connues, le neutrino et le photon, sont électriquement neutres. Des considérations énergétiques permettraient à l'électron de se désintégrer en ces particules, mais la conservation de la charge interdit de telles désintégrations. L'électron est, de fait, stable.

Dans la plupart des théories, les particules de matière noire ont une quantité conservée nommée « parité » qui vaut -1 , tandis que les autres particules connues ont une parité de $+1$. La désintégration d'une particule de matière noire en particules ordinaires ne conserverait pas la parité : la particule de matière noire est donc stable.

La théorie la plus simple, et satisfaisant à toutes les conditions listées ci-dessus, postule un unique type de particules formant la matière noire, le « wimp » (pour *weakly interacting massive particle*, soit particule massive interagissant faiblement). Le terme de « faiblement » est utilisé ici au sens large, et ne se réfère pas seulement à l'interaction faible. Plusieurs arguments théoriques sont en faveur de l'hypothèse des wimps (par exemple, la production de matière noire estimée dans les premiers instants de l'Univers est du même ordre de

LES AUTEURS



Bogdan DOBRESCU est physicien des particules au Fermilab, aux États-Unis.

Don LINCOLN est chercheur au Fermilab et travaille sur les données du LHC, le grand collisionneur de hadrons du Cern.

grandeur que le recensement qu'on en fait dans l'Univers actuel). Mais si les wimps existent, leur détection semble plus difficile que les physiciens ne s'y attendaient.

Depuis les années 1990, les physiciens ont mis en place de nombreuses expériences pour détecter les wimps par le biais de leurs très rares interactions avec la matière ordinaire. Afin de parvenir à la sensibilité nécessaire, les détecteurs sont refroidis à des températures très basses et installés sous terre pour les protéger des rayons cosmiques. Malgré des expériences de plus en plus précises, aucun signe concluant de wimps n'a émergé. On peut supposer que les interactions sont si rares qu'elles restent en deçà du seuil de détection des expériences, mais de telles caractéristiques ne s'accordent pas de façon naturelle avec le modèle des wimps.

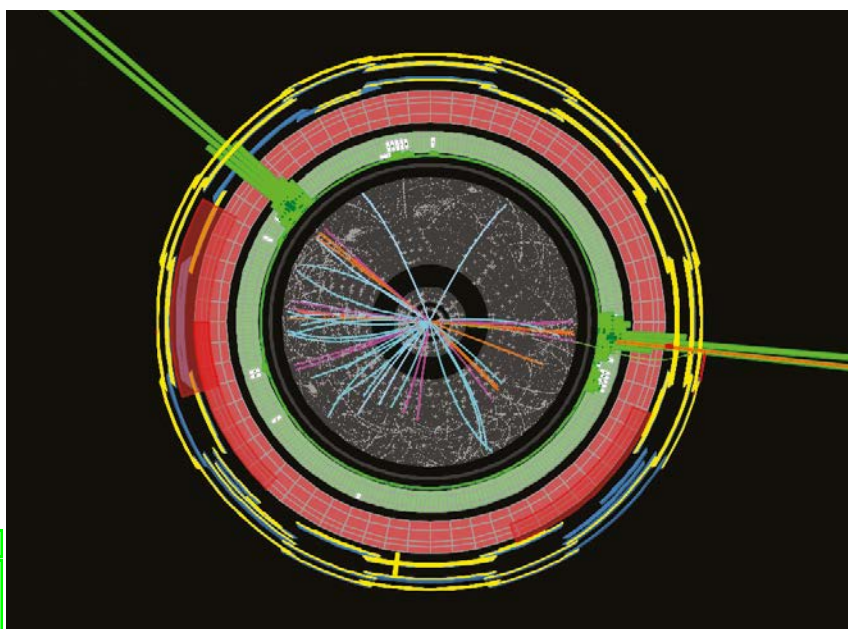
Par ailleurs, ce modèle prévoit que les petites galaxies satellites en orbite autour de la Voie lactée devraient être bien plus nombreuses que celles observées. Cependant, la situation évolue rapidement ; la découverte récente par la collaboration DES (*Dark Energy Survey*) de galaxies satellites supplémentaires suggère que les galaxies naines de la Voie lactée n'auraient tout simplement pas encore été trouvées.

Pour expliquer de façon plus naturelle la non-détection de matière noire, certains physiciens ont commencé à explorer des modèles de matière noire moins classiques. Une piste consiste à supposer qu'il existe plus d'un type de particules de matière noire et que celles-ci seraient sensibles à une force qui n'agirait pas sur la matière ordinaire.

Dans ces modèles, ces particules porteraient, par exemple, un nouveau type de « charge sombre », attractive ou répulsive tout en les laissant électriquement neutres. De la même façon que les particules ordinaires dotées d'une charge électrique peuvent émettre des photons (les particules de lumière, vectrices de l'interaction électromagnétique), ces hypothétiques particules dotées de cette charge sombre pourraient émettre des « photons sombres ».

On retrouve des lois qui rappellent celles de la matière ordinaire sans pour autant en être une réplique exacte. Par exemple, l'échange de photons noirs entre particules

La matière
noire, dans certains
modèles, formerait
**des sortes
d'atomes**
qui échangeraient
des photons
sombres



L'EXPÉRIENCE ATLAS DU LHC, le grand collisionneur de hadrons du Cern, pourrait détecter des signaux (tels ci-dessus) trahissant la production de particules de matière noire et confirmer ou infirmer des modèles théoriques postulant l'existence de photons sombres.

de matière noire doit être moins fréquent que l'échange de photons pour la matière ordinaire. L'une des raisons est la suivante. Au sein de la matière ordinaire, l'émission de photons permet aux particules d'échanger de l'énergie. Cela a une conséquence importante sur la formation des galaxies. Les nuages de gaz au sein d'une galaxie en formation rayonnent de l'énergie, ce qui a pour effet d'agréger la matière au sein des nuages. La conservation du moment cinétique (qui mesure une rotation) empêche la matière de se contracter jusqu'à un certain point, et la structure forme un disque. Si les particules de matière noire émettaient des photons sombres comme la matière ordinaire échange des photons, on aurait aussi des disques de matière noire. Or pour expliquer la forme des galaxies, la matière noire devrait être plutôt distribuée sous la forme d'un nuage sphérique, le « halo ».

Avec des échanges de photons noirs limités, la perte d'énergie du halo de matière noire serait minime. On peut cependant imaginer des modèles où une petite fraction de la matière noire échange des photons noirs en grande quantité, tandis que la majeure partie se comporterait plutôt comme de simples wimps. Les théoriciens, dont l'un de nous (Bogdan Dobrescu), étudient ces différentes possibilités en prenant en compte les limites imposées par les expériences actuelles. L'un des scénarios les plus simples implique deux

sortes de particules de matière noire et offre un aperçu de la physique qui pourrait être à l'œuvre dans ce domaine.

Imaginez un univers où il existe une particule avec une charge sombre positive et son homologue de charge négative. Dans ce modèle, il y aurait une forme d'électromagnétisme sombre, conduisant les particules de matière noire à émettre et absorber des photons sombres. Et de la même façon qu'une particule de matière ordinaire et son homologue d'antimatière, de charge opposée, s'annihilent en libérant des photons, deux particules de matière noire de charges sombres opposées s'annihileraient en photons sombres.

Le côté obscur des photons

Comme nous l'avons vu, ces échanges de photons sombres influeraient sur la forme des galaxies. Les physiciens utilisent ces contraintes pour estimer l'intensité de l'interaction électromagnétique sombre et la fréquence à laquelle se produit l'annihilation de la matière noire. Cette interaction ne doit pas être trop forte pour maintenir un halo sphérique autour des galaxies. En 2009, Lotty Ackerman, Matthew Buckley, Sean Carroll et Marc Kamionkowski, tous alors à l'Institut de technologie de Californie, ont montré que cette contrainte implique que la charge liée à l'interaction

sombre doit être très petite, environ 1 % de la valeur de la charge électrique.

Jusqu'à présent, nous avons décrit une version de la matière noire comportant simplement une particule sombre chargée et son homologue de charge opposée, qui échangent des photons sombres. Ce scénario reste simple comparé à la complexité de la matière ordinaire. À quoi ressemblerait un univers de matière noire avec plus de particules dotées de charges sombres ?

Un exemple intéressant a été proposé en 2013 à l'université Harvard par Jiji Fan, Andrey Katz, Lisa Randall et Matthew Reece. Ces chercheurs ont développé un scénario de « matière noire interagissant partiellement ». Ils ont supposé que l'essentiel de la matière noire était constitué de wimps, et qu'une petite composante comprenait deux types de particules, les unes lourdes et les autres légères. En outre, à l'instar des protons et des électrons, ces particules porteraient une charge sombre et échangeraient des photons sombres.

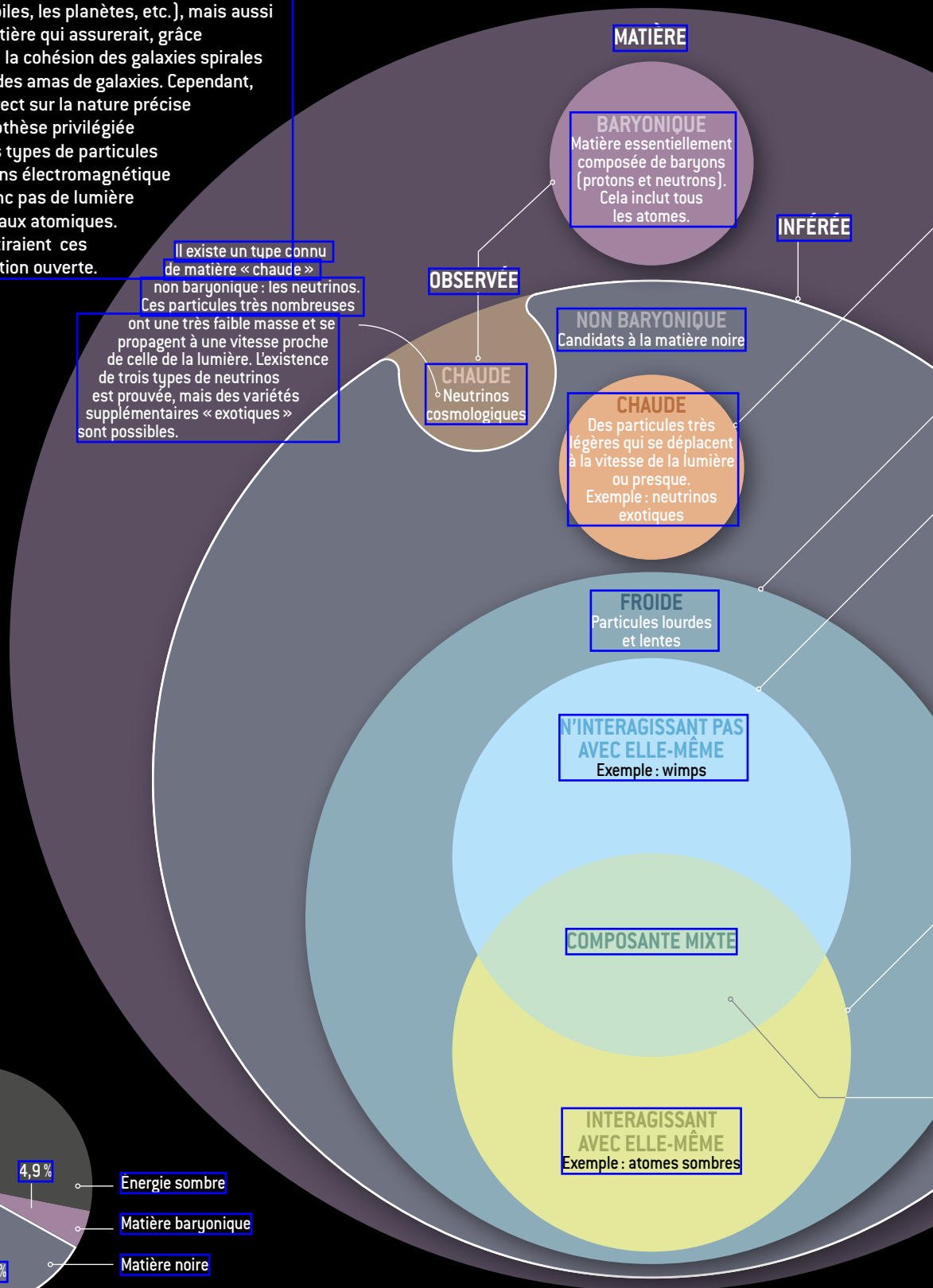
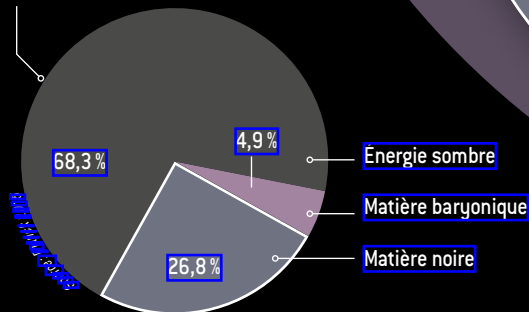
Il faut se garder de surinterpréter la correspondance, mais la situation proposée revient, à peu de chose près, à postuler un proton et un électron sombres, ainsi qu'un photon sombre pour porter l'électromagnétisme sombre qui les lie. Il n'est pas exclu que ces particules sombres se combinent pour créer des atomes sombres ou même des molécules sombres, avec toute une chimie associée.

Les auteurs de ce modèle ont calculé une limite supérieure à la fraction de matière noire qui pourrait interagir avec les photons sombres, au regard des contraintes imposées par les observations astronomiques. Ils ont déterminé que cette part de la matière noire aurait une masse globale comparable à celle de toute la matière visible. Dans ce modèle, la Galaxie aurait trois composantes : un grand nuage sphérique de particules de type wimps, qui représente 70 % de toute la matière, et deux disques aplatis, contenant chacun 15 % de la matière, l'un en matière ordinaire (la Voie lactée que nous voyons, par exemple), l'autre en matière noire interagissant fortement avec elle-même. Les deux disques seraient alignés ou à peine inclinés l'un par rapport à l'autre. Ainsi, une « galaxie » de matière noire coexisterait dans le même espace que la Voie lactée. Cependant, dans cette galaxie sombre, la matière noire ne formerait ni étoiles sombres ni grosses planètes sombres. En effet, de tels objets massifs seraient aisément détectés

Le cosmos contiendrait de la matière « baryonique » ordinaire (celle qui compose les étoiles, les planètes, etc.), mais aussi une forme invisible de matière qui assurerait, grâce à la force gravitationnelle, la cohésion des galaxies spirales en rotation rapide et celle des amas de galaxies. Cependant, il n'existe aucun indice direct sur la nature précise de la matière noire. L'hypothèse privilégiée est celle d'un ou plusieurs types de particules insensibles aux interactions électromagnétique et forte, et n'émettant donc pas de lumière et ne se liant pas aux noyaux atomiques. La forme exacte que revêtiraient ces particules reste une question ouverte.

Il existe un type connu de matière « chaude » non baryonique : les neutrinos. Ces particules très nombreuses ont une très faible masse et se propagent à une vitesse proche de celle de la lumière. L'existence de trois types de neutrinos est prouvée, mais des variétés supplémentaires « exotiques » sont possibles.

La masse étant reliée à l'énergie par la formule d'Einstein $E = mc^2$, l'énergie totale de l'Univers inclut la matière baryonique, la matière noire et l'énergie sombre, tenue pour être à l'origine de l'accélération de l'expansion de l'Univers.



LA MATIÈRE NOIRE DANS TOUS SES ÉTATS

CHAUDE

Si les particules de matière noire étaient rapides, elles ne se seraient jamais suffisamment agrégées pour former les nuages sphériques, ou halos, qui ont donné naissance aux galaxies individuelles. Cela n'exclut pas qu'une petite fraction de la matière noire totale puisse quand même être chaude.

FROIDE

Des particules de matière noire lentes rendent mieux compte des galaxies et de la distribution de la matière observée dans l'ensemble de l'Univers. Au moins 95 % de la matière noire est probablement froide.

N'INTERAGISSANT PAS AVEC ELLE-MÊME

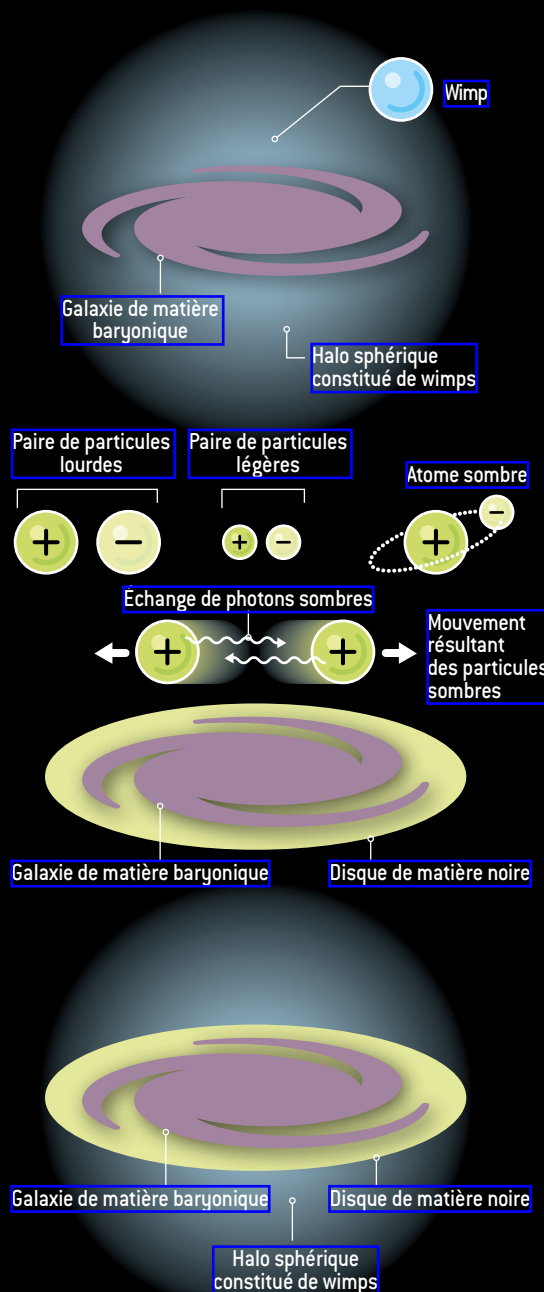
La forme la plus simple de particule de matière noire froide est une « particule massive interagissant faiblement », ou wimp, qui n'interagit que rarement voire jamais avec d'autres particules de sa propre espèce ou de matière ordinaire. Les wimps se rassemblent en halos sphériques qui attireraient la matière baryonique ordinaire par la force gravitationnelle et formeraient ainsi des galaxies.

INTERAGISSANT AVEC ELLE-MÊME

Si la matière noire interagit avec elle-même, elle doit le faire par l'intermédiaire d'une nouvelle force qui n'agit pas sur la matière baryonique. Cette interaction pourrait être une sorte d'électromagnétisme sombre : les particules portent une charge sombre, soit positive soit négative, et interagissent en échangeant des particules vectrices de l'interaction, les photons sombres. L'électromagnétisme sombre pourrait concerner de multiples types de particules sombres (certaines lourdes, d'autres légères) qui s'attirent les unes les autres et adoptent des configurations rappelant des atomes. Cette composante de la matière noire formerait, au sein des galaxies, un disque se superposant au disque à bras spiraux formés par la matière baryonique.

COMPOSANTE MIXTE

La matière noire pourrait être un mélange de deux types de particules froides, certaines n'interagissant pas avec elles-mêmes (comme des wimps) et d'autres interagissant avec elles-mêmes. Cela se traduirait à la fois par un halo sphérique de wimps autour des galaxies et un disque aplati de particules en auto-interaction.



par des effets de lentille gravitationnelle: en courbant localement l'espace-temps, ces astres sombres dévieraient la lumière qui nous parvient depuis des étoiles de matière ordinaire.

L'hypothèse d'un secteur sombre complexe offre de riches possibilités avec des conséquences astrophysiques intéressantes, mais comment tester ces modèles? Les physiciens recherchent la matière noire complexe de la même façon que les wimps: à l'aide de détecteurs souterrains. Un modèle où la matière noire interagit partiellement, tel celui proposé par Jiji Fan et ses collègues, présente un intérêt particulier pour les expériences de détection directe: le disque de matière noire situé dans le même plan que celui de la Voie lactée se traduit par une densité de matière noire plus importante que dans le simple modèle des wimps. Cela impliquerait des chances de détection plus élevées, même si l'absence de signal montre que cette probabilité est malgré tout très faible.

Outre les expériences de détection directe, les physiciens espèrent créer de la matière noire dans les accélérateurs de particules. Comme ils ont peu d'indications sur la façon dont la matière noire interagit avec

la matière ordinaire (et donc sur les processus spécifiques susceptibles d'en fabriquer dans l'accélérateur), ils étudient aussi bien des modèles à simples wimps que ceux à secteur sombre plus complexe.

Produire de la matière noire au LHC

Le LHC (grand collisionneur de hadrons) du Cern, près de Genève, est l'accélérateur le plus puissant du monde et peut donc sonder des scénarios à versions lourdes de la matière noire (plus une particule est massive, plus il faut d'énergie pour la produire dans un accélérateur). Ces particules de matière noire ne seraient pas directement visibles dans les détecteurs du LHC, car elles traverseraient les capteurs sans interagir. Les physiciens tentent de déduire leur présence de façon indirecte. Comme l'énergie est conservée, les chercheurs comparent l'énergie de la collision à celle de toutes les particules produites par la collision. S'il manque de l'énergie dans le bilan, c'est peut-être qu'une particule de matière noire non détectée a emporté l'énergie qui fait défaut. Une perte d'énergie peut avoir d'autres explications: une particule qui passe entre

les détecteurs, un neutrino qui n'interagit que rarement... Il n'est donc possible de conclure qu'en analysant un grand nombre de collisions. Concrètement, les physiciens calculent combien de collisions produisent une signature particulière d'énergie manquante, avec ou sans la présence de matière noire, et comparent aux données.

Jusqu'à présent, aucun signe de matière noire n'a été identifié au LHC, ce qui indique que les interactions de la matière noire avec la matière ordinaire sont très rares, si toutefois il s'en produit. Le LHC continue de prendre des données à plus haute énergie, ce qui augmente nos chances de découvrir un jour la matière noire.

Dans les expériences de détection directe et de production au LHC, les physiciens font l'hypothèse que les interactions de la matière noire avec la matière ordinaire sont beaucoup plus fortes que la gravitation (la plus faible de toutes les interactions), mais assez faibles pour ne pas encore avoir été observées. Cette hypothèse est nécessaire, car si la matière noire n'interagit que de façon gravitationnelle – dans cette éventualité, on parle parfois de «superwimps» –, nous ne l'observerons jamais dans ces expériences.



DANS LA TRAQUE DE LA MATIÈRE NOIRE, l'expérience *Xenon1T* est l'une des plus sensibles. Inaugurée fin 2015, elle est composée d'une cuve [représentée à gauche, au centre de l'affiche montrant l'intérieur de la structure] contenant près de une tonne de xénon liquide.

Si une particule de matière noire entre en collision avec un atome de xénon, elle déclenche un signal enregistré par des capteurs. Si cette expérience ne détecte pas de matière noire, il en résultera des contraintes fortes sur les propriétés de cette dernière.

En plus des recherches de matière noire que nous venons de décrire, et qui conviennent à la fois pour trouver des wimps et de la matière noire complexe, certaines approches visent plus spécifiquement le secteur sombre complexe. Celles-ci ciblent en particulier le photon sombre qui, dans certains modèles, peut spontanément se transformer en photon ordinaire et se retransformer en photon sombre en vertu des lois de la physique quantique. Or le photon ordinaire est détectable.

De plus, si le photon sombre a une masse non nulle (le terme de « photon » est alors un peu abusif puisqu'un photon n'a *a priori* pas de masse), le photon ordinaire produit peut avoir assez d'énergie pour créer une paire constituée d'un électron et de son homologue d'antimatière, le positron, ou une paire muon-antimuon (le muon étant un cousin, plus lourd, de l'électron).

Partant de ce scénario, plusieurs collaborations expérimentales, dont une à laquelle participe l'un de nous (Don Lincoln), étudient la production de paires électron-positron ou muon-antimuon dans des accélérateurs de particules. Si des photons sombres existent et interviennent dans le processus, les caractéristiques des paires seront altérées. Des études de ce genre sont en cours au LHC et dans d'autres accélérateurs, tel le projet *KLOE-2*, en Italie, les expériences *HPS* et *BaBar*, aux États-Unis.

Le Fermilab, près de Chicago, offre une autre piste intéressante. Les physiciens y produisent actuellement des faisceaux intenses de neutrinos dirigés vers des détecteurs lointains. Les neutrinos sont des particules très légères, qui interagissent avec les électrons des détecteurs par l'interaction faible (en échangeant un boson *W*). Il est possible de calculer la probabilité d'interaction selon ce processus. Mais, si les photons sombres existent, les neutrinos interagissent aussi avec les électrons du détecteur en échangeant un photon sombre. Et cela modifie les probabilités d'interaction. Il serait possible de mesurer ces interactions neutrino-électron dans les détecteurs *MiniBooNE*, *MINOS* ou *NOvA* du Fermilab.

Enfin, les scientifiques recherchent des indices astrophysiques de l'interaction de la matière noire dans des situations telles que les collisions de galaxies. Quand la matière noire d'une galaxie heurte celle d'une autre galaxie, les particules devraient se repousser en échangeant des photons

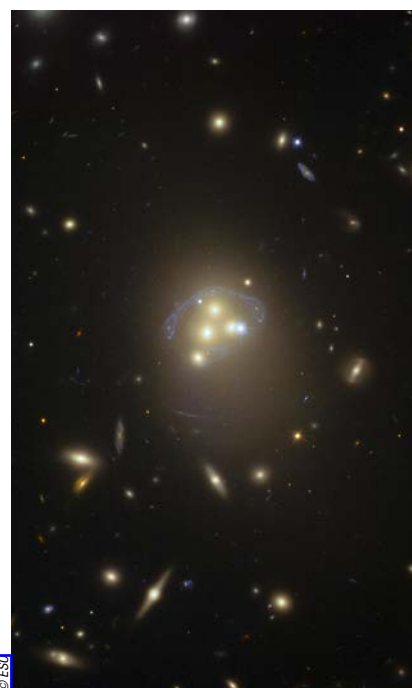
sombres. Plusieurs études de collisions de galaxies n'ont pas permis de trouver d'indices de ce phénomène, mais, en 2015, l'observation de l'amas Abell 3827, particulièrement proche de la Terre et bien orienté, a suggéré un tel motif. C'est un premier indice en faveur d'une matière noire complexe, mais des observations complémentaires de ces galaxies et d'autres seront nécessaires pour le confirmer.

Nous sommes indiscutablement confrontés à une énigme profonde. À grande échelle, de nombreuses observations s'expliquent par la présence de matière noire, sous une forme ou sous une autre. L'échec de la détection directe de matière noire souligne l'urgence qu'il y a à identifier la nature de la matière noire. Là où les modèles de wimps ont du mal à expliquer cette non-détection, les modèles complexes s'en accommodent plus naturellement, dans la mesure où ils reposent sur un nombre plus grand de paramètres à ajuster.

Épicycles du XXI^e siècle ?

On pourrait adresser une critique à cette approche : on se donne beaucoup de mal à maintenir en vie l'hypothèse de la matière noire. La situation est-elle analogue à celle des épicycles, quand les astronomes du XVI^e siècle tentaient à tout prix de sauver le géocentrisme en ajoutant une série constante d'ajustements à une théorie fatalement défectueuse ? Ce n'est pas notre avis : la matière noire explique remarquablement bien de nombreuses énigmes astronomiques, et il n'y a *a priori* pas de raison pour que la matière noire soit aussi simple que dans le modèle des wimps – le plus répandu car le plus simple à étudier.

Par ailleurs, les modèles de matière noire complexe apportent des solutions à certaines difficultés théoriques des wimps. Par exemple, dans les simulations numériques de formation des galaxies, les modèles de wimps prévoient des halos ayant une densité très élevée au centre, ce qui ne s'accorde pas avec les observations. Les modèles de matière noire complexe aplanissent, eux, la distribution au centre. Il y a donc plus d'un intérêt à explorer ces modèles complexes. En outre, tant que nous ne trouverons pas la solution au mystère de la composition du cosmos, nous devons être ouverts à la multitude d'explications possibles. ■



LES QUATRE GALAXIES au sein de l'amas Abell 3827 sont entrées simultanément en collision. Les halos de matière noire ne devraient pas être perturbés par cette rencontre si la matière noire n'interagit pas avec elle-même autrement que par la force gravitationnelle. Or une équipe d'astrophysiciens aurait trouvé des signes d'une telle interaction. Des indices à confirmer.

BIBLIOGRAPHIE

K. Freese, *The cosmic cocktail : Three parts dark matter*, Princeton University Press, 2014.

JiJi Fan *et al.*, *Dark-disk universe*, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 110(21), article 211302, 2013.

J. Feng et M. Trodden, *Matière noire, un univers caché*, *Pour la Science*, n° 399, janvier 2011.

D. E. Kaplan *et al.*, *Atomic dark matter*, *JCAP*, vol. 2010(5), article 21, 2010.

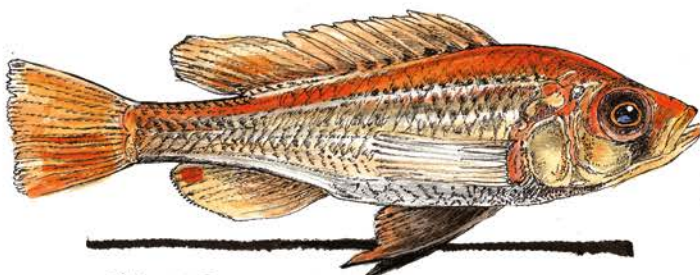
L. Ackerman *et al.*, *Dark matter and dark radiation*, *Phys. Rev. D*, vol. 79(2), article 023519, 2009.

Cichlidés

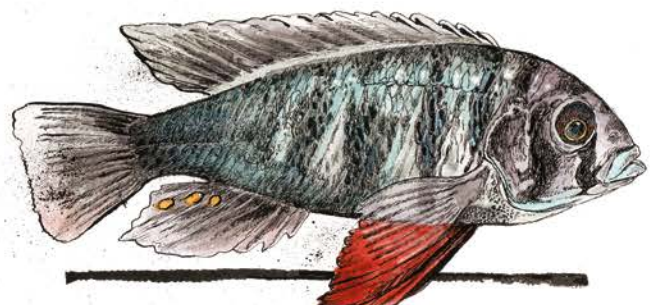
les clés d'une spectaculaire évolution

Axel Meyer

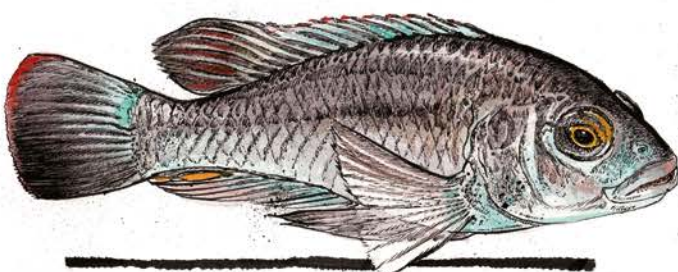
Les poissons cichlidés comptent plus de 2 500 espèces, dont beaucoup sont apparues en moins de 15 000 ans. Chez les vertébrés, il s'agit d'un record absolu, dont les ressorts sont tapis dans le génome.



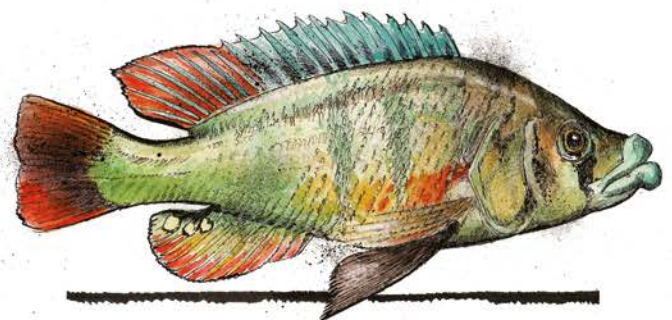
Yssichromis pyrrhocephalus



Neochromis omnicaruleus

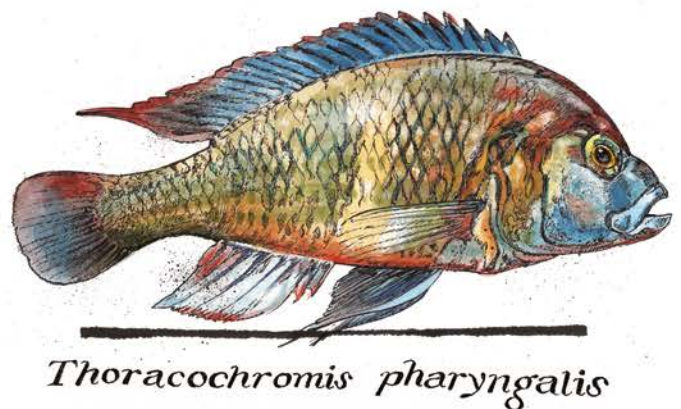
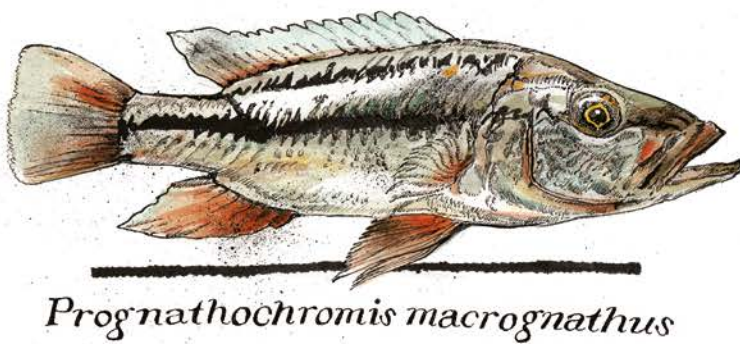
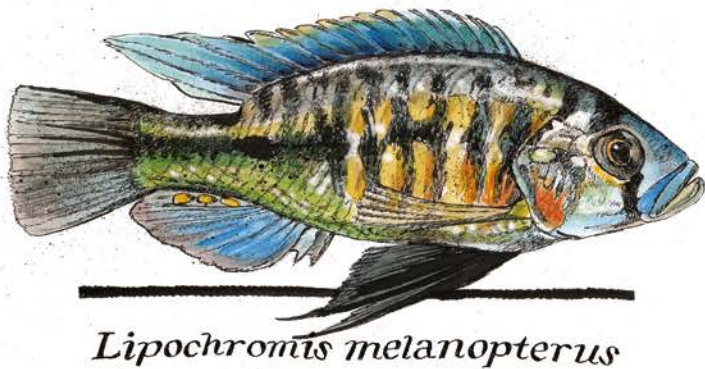
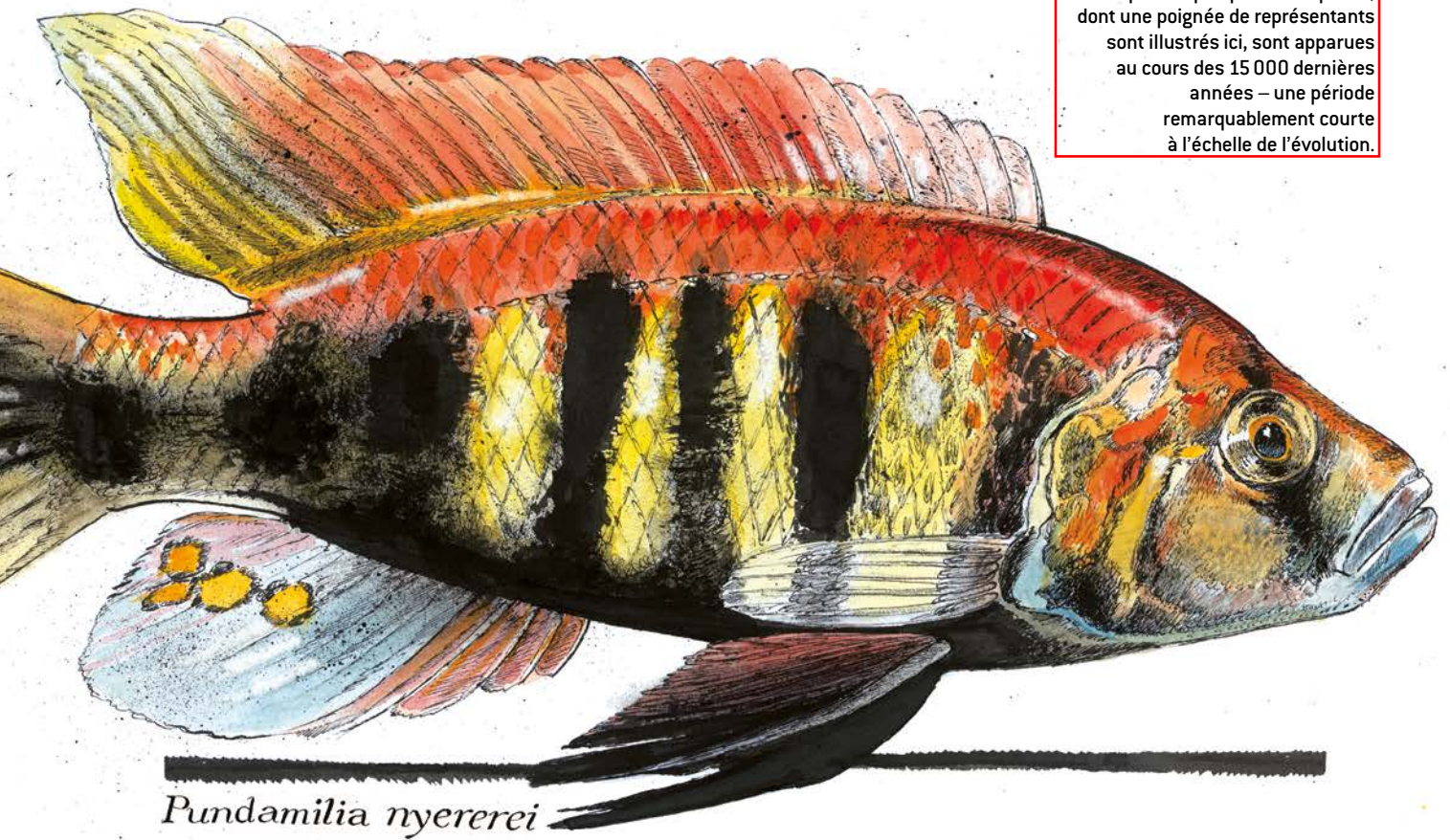


Macropleurodus bicolor



Paralabidochromis chilotes

UNE EXTRAORDINAIRE VARIÉTÉ
de poissons cichlidés vit dans le lac
Victoria, en Afrique de l'Est. On estime
que les quelque 500 espèces,
dont une poignée de représentants
sont illustrés ici, sont apparues
au cours des 15 000 dernières
années – une période
remarquablement courte
à l'échelle de l'évolution.



Le lac Victoria, en Afrique, héberge l'une des plus grandes expériences de l'évolution. Une lignée unique de poissons appartenant à la famille des Cichlidés y a donné naissance, au fil du temps, à une myriade de formes.

Rappelez-vous les pinsons étudiés par Charles Darwin : isolés sur des îles différentes de l'archipel des Galápagos, ces pinsons ont acquis des becs distincts, adaptés en taille et en forme aux diverses sources de nourriture disponibles. Ils représentent un exemple classique de ce que les biologistes nomment une radiation adaptative ou évolutive – le phénomène par lequel une lignée engendre de nombreuses espèces qui développent des spécialisations répondant à une série de rôles écologiques.

Cependant, les cichlidés du lac Victoria surpassent de loin les pinsons de Darwin par la vitesse stupéfiante à laquelle ils se sont diversifiés : les quelque 500 espèces qui vivent exclusivement dans ce lac africain sont toutes apparues au cours des 10 000 à 15 000 dernières années, un bref instant à l'échelle géologique. Les 14 espèces de pinsons de Darwin ont, elles, émergé au fil de plusieurs millions d'années.

Le lac Victoria n'est pas le seul endroit où l'on trouve des cichlidés. D'autres lacs et cours d'eau tropicaux en Afrique, sur le continent américain et à la pointe du sous-continent indien, abritent leurs propres cichlidés. En tout, on estime que la famille compte plus de 2 500 espèces, et il reste à en décrire formellement de nombreuses. Certains de ces poissons, tels les tilapias, sont élevés à des fins alimentaires et figurent parmi les espèces les plus importantes de l'aquaculture. La plupart des cichlidés, tels les oscars et les scalaires, sont appréciés des aquariophiles pour leur beauté et leurs comportements nuptiaux et parentaux, à la fois variés et intéressants.

Les cichlidés partagent leurs lacs avec d'autres familles de poissons, mais ils sont les seuls à avoir connu une spéciation aussi étendue et aussi rapide. Aucun autre groupe de vertébrés ne rivalise avec les cichlidés en termes de nombre d'espèces et de variété dans les formes, les colorations et les comportements. Cependant, l'évolution s'est souvent répétée chez ces poissons : curieusement, plusieurs adaptations identiques sont apparues dans des lignées distinctes.

De nombreux scientifiques, dont je fais partie, s'étonnent depuis longtemps de la multiplicité de formes des cichlidés et se

demandent quels facteurs ont permis à ce groupe de se diversifier de façon aussi spectaculaire.

Les nouvelles techniques de séquençage du génome nous ont permis d'étudier de près leur ADN pour tenter de dissiper le mystère de cette exubérance évolutive. Nous sommes encore loin d'avoir résolu l'énigme de la diversité des cichlidés, mais nous avons identifié des particularités dans leurs génomes, qui pourraient les prédisposer à se diversifier aussi rapidement tout en faisant apparaître certains traits à plusieurs reprises. L'exploration des fondements génétiques du succès de cette famille de poissons laisse entrevoir les rouages les plus intimes de l'évolution, ce qui aidera les chercheurs à décoder les origines de toutes sortes d'espèces.

Des racleurs d'algues aux prédateurs

Pour se faire une meilleure idée de l'extraordinaire diversité des cichlidés, il suffit de se pencher sur les formes que l'on trouve dans le lac Victoria et dans les deux autres lacs où les principales radiations de cichlidés est-africains se sont produites : le lac Malawi, qui héberge 800 à 1 000 espèces, et le lac Tanganyika, avec ses quelque 250 espèces issues de lignées plus anciennes, dont l'une a colonisé les deux autres lacs, plus jeunes, où elle a connu des radiations évolutives.

Ces cichlidés présentent toutes les couleurs de l'arc-en-ciel et leur taille va de quelques centimètres à un mètre. Ils se sont en outre adaptés de façon à exploiter toutes les sources de nourriture offertes par leur environnement. Les racleurs d'algues ont des dents plates similaires aux incisives humaines, avec lesquelles ils grignotent les excroissances nutritives à la surface des roches. Les insectivores ont des dents longues et pointues qui les aident à explorer les anfractuosités rocheuses. Les prédateurs chassant à l'affût ont d'énormes mâchoires extensibles avec lesquelles ils s'emparent de leurs proies en quelques millisecondes.

Il ne s'agit là que de quelques-unes des plus grandes catégories de spécialisation. Parmi les racleurs d'algues, par exemple, certaines espèces sont adaptées à la recherche de nourriture dans les zones de brisants, d'autres dans un amas de roches bien particulier et nulle part ailleurs, tandis que d'autres encore ne se nourrissent qu'en abordant les rochers

L'ESSENTIEL

■ Les Cichlidés constituent la famille de vertébrés la plus diversifiée, avec plus de 2 500 espèces.

■ Grâce à l'étude de leurs génomes, le mystère de la diversification stupéfiante de ces poissons commence à s'éclaircir.

■ Les génomes de cichlidés présentent des particularités, auxquelles l'évolution accélérée de ce groupe serait due.

■ D'autres caractères génétiques expliqueraient l'apparition répétée, dans plusieurs lignées de cichlidés, des mêmes adaptations.

sous un certain angle ou ne mangent qu'un type particulier d'algues.

Pourtant, malgré la grande variété des cichlidés d'Afrique de l'Est, certains caractères hautement spécialisés sont apparus un nombre surprenant de fois au cours de l'évolution.

Par exemple, plusieurs espèces de cichlidés des trois lacs se nourrissent presque exclusivement des écailles d'autres poissons. Ils ont tous développé les mêmes dents en forme de râtelier qui leur permettent de s'accrocher aux écailles de leurs victimes. Mais leurs dents ne sont pas la seule adaptation à ce régime alimentaire. Leurs mâchoires sont devenues asymétriques, s'ouvrant vers la gauche ou vers la droite, mais pas des deux côtés, afin de mieux saisir les écailles d'un côté particulier de leurs proies. Ainsi, les cichlidés « orientés à gauche » grattent les écailles du côté droit de leur victime, et ceux « orientés à droite » grattent le côté gauche.

La sélection naturelle a gardé un équilibre dans ces formes asymétriques : environ la moitié des mangeurs d'écailles que nous avons prélevés dans la région du lac Tanganyika étaient orientés vers la droite, l'autre moitié vers la gauche. Les mangeurs d'écailles ont donc un ensemble très particulier d'adaptations à leur mode de vie, mais, d'une manière ou d'une autre, ces mêmes caractères se sont développés au moins à trois reprises dans ces lacs d'Afrique de l'Est.

Une autre adaptation distinctive qui s'est produite indépendamment à plusieurs reprises est la présence de lèvres hypertrophiées chez certaines espèces recherchant leurs proies dans les crevasses rocheuses. Nous avons montré que ces lèvres « à la Angelina Jolie » jouent le rôle de joints d'étanchéité qui aident les poissons à aspirer leurs proies hors de leur cachette. Les cichlidés dépourvus de telles lèvres ne parviennent pas à atteindre efficacement les proies dissimulées dans les anfractuosités. Et une fois encore, des espèces dans les trois radiations africaines, ainsi que dans deux radiations du Nouveau Monde, ont développé ce caractère en parallèle.

De même, des patrons de coloration distinctifs sont apparus indépendamment dans diverses lignées de cichlidés. Alors que la vaste majorité des poissons de cette famille présentent des rayures verticales sombres, qui leur servent vraisemblablement à se camoufler des prédateurs, quelques-unes des espèces de chacun des

trois lacs d'Afrique orientale ont également développé des rayures horizontales. Ces motifs très différents se manifestent le plus souvent chez les espèces en eau libre, qui sont généralement des nageurs rapides et des prédateurs, sans doute parce que les rayures horizontales aident à les dissimuler aux yeux de leurs proies.

Parer au risque de la spécialisation

Apparemment contradictoires, la diversification extrême et l'apparition répétée d'adaptations très spécialisées soulèvent des questions importantes. La première concerne le mode d'alimentation très spécialisé et l'observation selon laquelle, normalement, l'adaptation à une alimentation très particulière signifie que, si la source de nourriture vient à manquer, l'animal spécialisé est en danger.

Comment les cichlidés sont-ils parvenus à éviter cet écueil ? Grâce semble-t-il à une étrange caractéristique anatomique, unique parmi les poissons d'eau douce. Ils ont une paire normale de mâchoires buccales et une paire secondaire de mâchoires située dans la gorge, comme le monstre du film *Alien*. Toute la nourriture qu'ils ingèrent est happée et broyée par les mâchoires

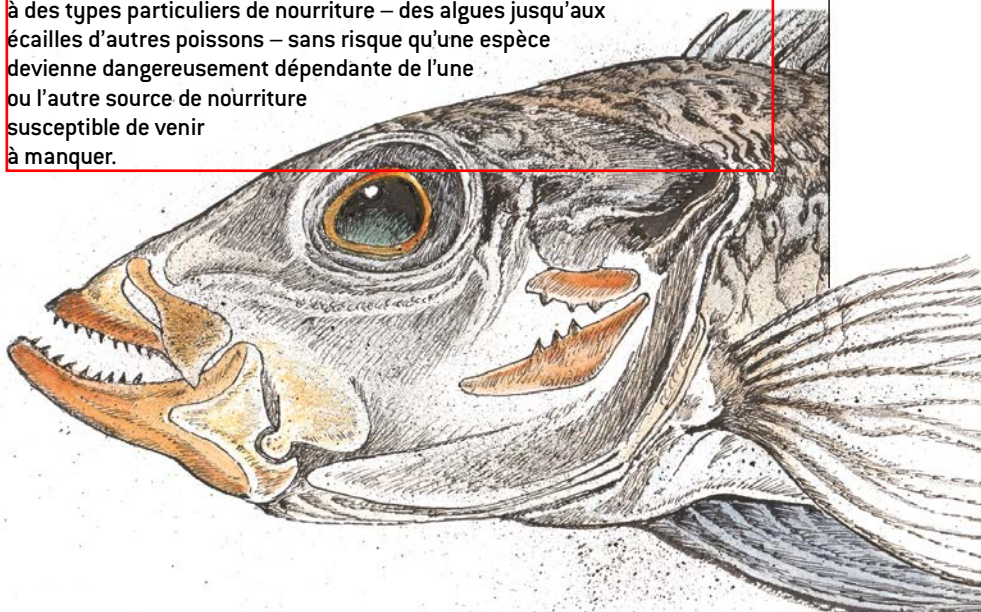
L'AUTEUR



Axel MEYER est professeur de zoologie et de biologie évolutive à l'université de Constance, en Allemagne. Il a été l'un des premiers scientifiques à utiliser des séquences d'ADN pour étudier les différences entre les espèces et la spéciation.

L'UN DES SECRETS DU SUCCES : DES MÂCHOIRES DE RÉSERVE

Tous les cichlidés présentent les mâchoires buccales habituelles, mais ils ont aussi une seconde paire de mâchoires, situées dans la gorge. La nourriture ingérée est mastiquée par les deux séries de mâchoires. Cette duplication laisse les mâchoires buccales libres de développer des adaptations à des types particuliers de nourriture – des algues jusqu'aux écailles d'autres poissons – sans risque qu'une espèce devienne dangereusement dépendante de l'une ou l'autre source de nourriture susceptible de venir à manquer.

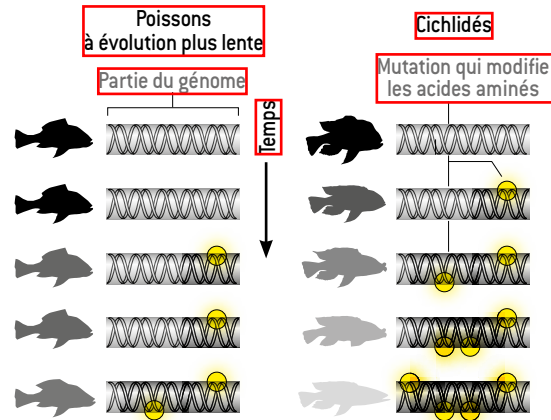


DES INDICES FOURNIS PAR LE GÉNOME

Le séquençage et l'analyse récents des génomes de cichlidés africains ont révélé plusieurs mécanismes qui ont pu aider la famille des Cichlidés à se diversifier rapidement. Certains de ces mécanismes contribueraient aussi à expliquer un autre aspect mystérieux de ce groupe de poissons : le degré extrême d'évolution parallèle, où les mêmes caractères très spécialisés se manifestent indépendamment dans différentes lignées.

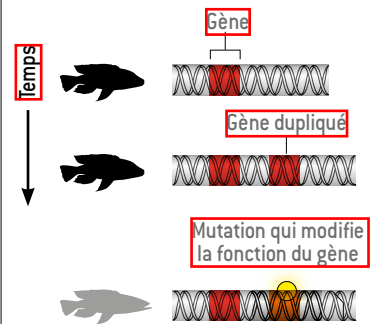
MUTATIONS NOMBREUSES

Un nombre inhabituellement important de mutations, qui ont modifié des acides aminés composant les protéines des cichlidés, suggère que les gènes impliqués ont été soumis à une pression de sélection intense, de telle sorte qu'ils ont évolué rapidement.



DUPLICATION DE GÈNES

Les génomes de cichlidés présentent un taux élevé de duplication génique, où des erreurs dans la réplication de l'ADN produisent de multiples copies de gènes. Les copies supplémentaires peuvent changer de fonction sans dommage pour l'animal et donc l'aider à s'adapter à son environnement.



© 2016 L'ESPRESSO

buccales puis par les mâchoires pharyngées. Par conséquent, les cichlidés peuvent avoir des mâchoires buccales adaptées à un type de nourriture, et leurs dents pharyngées viennent à bout du reste. De cette façon, de nombreux cichlidés sont devenus à la fois des touche-à-tout et des spécialistes. En d'autres termes, ils ont développé une spécialisation mais sont restés en même temps des généralistes, au cas où s'épuiserait leur type de nourriture préféré ou se présenterait une meilleure occasion.

Les mâchoires pharyngées expliquent comment les cichlidés ont pu limiter le risque d'une spécialisation, mais quelle a été la source de toute la nouveauté évolutive chez ces poissons ? Quels facteurs ont poussé les gènes qui codent leurs caractères à changer aussi rapidement, et comment les mêmes adaptations apparaissent-elles si souvent dans des lignées séparées ?

Récemment, grâce à l'avènement de méthodes rapides de séquençage de l'ADN pour la recherche médicale, mes collègues et moi (un consortium de plus de 70 chercheurs du monde entier) avons commencé à répondre à ces questions et à résoudre le mystère des cichlidés.

En 2014, pour la première fois, nous avons séquençé des génomes de cichlidés. Nous avons obtenu les séquences complètes de l'ADN de cinq espèces africaines et les séquences partielles de 60 individus

de 6 espèces fortement apparentées rien que dans le lac Victoria. En comparant ces génomes entre eux et à ceux de parents des cichlidés, les épinoches (une famille de poissons bien moins diversifiée), nous avons identifié chez les cichlidés des caractéristiques qui aident à comprendre leur diversité.

Des génomes de cichlidés à l'étude

Dans ces génomes, le Cichlid Genome Consortium a recherché en priorité des mutations ayant produit des modifications dans les acides aminés qui composent les protéines. Les protéines réalisent une grande partie des tâches dans les cellules. Or de multiples gènes spécifient les séquences d'acides aminés dont les protéines sont formées. Si un organisme contient de nombreuses protéines aux acides aminés altérés, c'est qu'une forte pression sélective s'exerce sur les gènes correspondants et a provoqué leur évolution rapide. En d'autres termes, les conditions étaient telles que les poissons présentant certaines modifications d'acides aminés ont obtenu un avantage important en termes de survie ou de reproduction.

Nous avons découvert que même les espèces de tilapia (un cichlidé peu remarquable du point de vue de l'évolution par

rapport à ses homologues) présentent bien plus de mutations que les épinoches. Et les cichlidés des groupes hyperdiversifiés du lac Malawi et du lac Victoria ont des mutations plusieurs fois plus fréquentes que le tilapia.

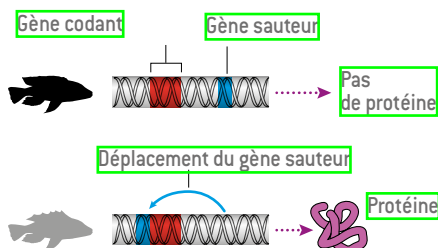
Beaucoup des gènes modifiés sont impliqués dans le développement des mâchoires, ce qui paraît logique quand on observe la grande variété d'adaptations alimentaires des cichlidés. Une pression de sélection intense agissant sur de nombreux gènes est donc l'un des mécanismes qui ont accéléré la spéciation des cichlidés.

Toutefois, les gènes individuels peuvent eux aussi se révéler très influents. Nous avons la preuve qu'un gène unique détermine l'orientation des rayures des cichlidés. Des gènes qui, à eux seuls, influencent fortement l'apparence d'un organisme expliqueraient pourquoi il existe autant de types de cichlidés.

Nous étions également impatients de rechercher dans les génomes de cichlidés des copies multiples de gènes individuels. Les scientifiques savent depuis des décennies que le génome contient parfois plusieurs exemplaires d'un gène. Cette duplication – qui découle d'erreurs dans la réplication de l'ADN – est l'un des mécanismes les plus importants qui permettent à la fonction des gènes de se diversifier rapidement. Fondamentalement, si un gène est dupliqué,

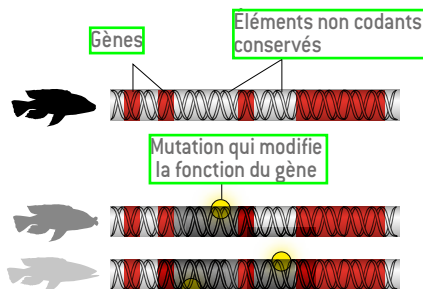
GÈNES SAUTEURS

Des sections du génome sont souvent dupliquées, et les copies peuvent sauter d'un endroit du génome à un autre. On appelle ces copies « gènes sauteurs » ou « transposons ». Elles modifient parfois la fonction d'un gène proche codant une protéine. Les cichlidés semblent avoir subi plusieurs périodes durant lesquelles les gènes sauteurs se sont rapidement accumulés, ce qui a pu accélérer leur évolution.



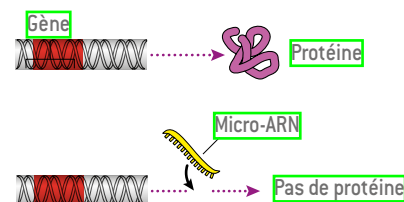
MUTATIONS DE RÉGIONS NON CODANTES

Certaines régions du génome qui ne codent pas de protéines tendent à être conservées au fil de l'évolution, probablement parce qu'elles affectent la fonction des gènes. Les cichlidés présentent nettement plus de mutations qu'attendu dans certaines de ces régions, ce qui suggère que les gènes associés ont changé de fonction.



DE NOUVEAUX MICRO-ARN

De petits éléments génétiques nommés microARN, capables de bloquer ou de modifier l'expression d'un gène, sont aussi généralement conservés au fil de l'évolution. Mais les cichlidés présentent davantage de nouveaux micro-ARN que les autres poissons. Étant donné leur capacité à contrôler des gènes dans des tissus particuliers, ces micro-ARN ont peut-être rendu possible le façonnage précis qui a donné lieu aux spécialisations alimentaires des cichlidés.



la nouvelle copie est libre de changer sans enlever à l'animal le matériel codé par le gène (parce que l'autre copie fonctionne toujours), et le changement l'aidera peut-être à s'adapter à son environnement. Généralement, les mutations qui ne portent pas préjudice à leur hôte sont rares. Or nos analyses génétiques montrent que les cichlidés ont des taux de duplication de gènes jusqu'à cinq fois supérieurs à ceux des poissons « normaux » tels que les épinoches, ce qui augmente d'autant les chances de diversification des gènes.

Un troisième type de mécanisme génomique que nous voulions analyser était l'activité de gènes « sauteurs ». Ces gènes n'ont aucune fonction évidente, mais ils produisent des copies d'eux-mêmes qui s'insèrent ailleurs dans l'ADN : ils « sautent » donc d'un emplacement du génome à un autre. Ils constituent une force évolutive potentielle lorsqu'ils s'insèrent assez près d'un gène codant une protéine pour changer sa fonction.

De tels gènes constituent environ 16 à 19 % du génome d'un poisson classique. Chez les cichlidés, nous avons identifié des signes révélateurs de plusieurs périodes pendant lesquelles les gènes sauteurs se sont accumulés rapidement, notamment pendant la radiation du lac Victoria. Cette simultanéité suggère que les gènes sauteurs ont favorisé la diversification des cichlidés.

Nous avons également étudié les séquences d'ADN qui, d'ordinaire, ne connaissent pas beaucoup de modifications. Certaines régions du génome, qui ne codent pas de protéines, restent inchangées durant de longues périodes à l'échelle de l'évolution. Ces éléments non codants conservés ou CNE (pour *Conserved Noncoding Elements*) ont probablement un effet sur le fonctionnement des gènes. Sinon, des mutations aléatoires s'accumuleraient, comme elles le font généralement au fil du temps dans les régions non conservées, ce qui rendrait ces éléments différents d'une espèce à l'autre. Les cichlidés partagent un certain nombre de CNE, entre eux et avec des espèces à la parenté plus lointaine, telles que les épinoches. Mais en étudiant de plus près l'ADN, nous avons découvert que, bien que les CNE des cichlidés soient suffisamment similaires d'une espèce à l'autre pour qu'on les regroupe, ils ont subi davantage d'altérations qu'on aurait pu attendre pour ce type d'élément considéré comme très conservé. Environ 60 % des CNE ont subi des modifications significatives dans des lignées particulières de cichlidés. Ce pourcentage étonnamment élevé suggère que les gènes auxquels ces CNE sont liés pourraient avoir changé de fonction.

Des expériences ultérieures ont corroboré cette hypothèse : nos collègues de

l'Institut de biologie moléculaire et cellulaire de Singapour ont étudié la fonction des CNE conservés et altérés des cichlidés en insérant ce matériel génétique dans les génomes de poissons zèbres. Ils ont établi que ces éléments modulent différemment l'expression des gènes associés – signe évident que l'évolution des CNE modifie la fonction des gènes chez les cichlidés.

Un autre type de matériel génétique, enfin, tend à être fortement conservé entre espèces : les micro-ARN. Ces petites molécules agissent comme des déclencheurs pour les gènes, leur indiquant où et quand ils doivent s'exprimer. Nous avons été surpris d'en découvrir 40 qui n'avaient jamais été repérés auparavant chez d'autres poissons.

Des micro-ARN en action

Nous avons alors étudié des embryons de cichlidés pour déterminer où certains de ces micro-ARN régulaient l'expression des gènes. Il nous est apparu qu'ils agissent de façon très spécifique, exerçant leur influence uniquement dans certains tissus, par exemple une région particulière du squelette facial. L'activité ciblée des micro-ARN suggère leur possible implication dans le façonnage de précision qui a donné lieu aux diverses spécialisations alimentaires caractéristiques des cichlidés, entre autres traits.

Nous sommes encore loin de comprendre si les centaines de micro-ARN présents dans les génomes de cichlidés jouent un rôle dans l'évolution de cette famille de poissons et si oui, comment; mais ce sont des candidats sérieux pour un tel rôle. En bloquant l'expression des gènes au mauvais endroit ou au mauvais moment, les micro-ARN favoriseraient l'apparition de variations de certains traits – dents, mâchoires, couleurs, comportements nuptiaux, etc. –, variations qui sont au fondement de l'adaptation et de la spéciation.

Cette analyse initiale des

génomés de cichlidés suggère que des mutations aléatoires, telles celles constatées sur les CNE et celles donnant naissance à de nouveaux micro-ARN, jouent un rôle important dans l'évolution de ces poissons. Nous soupçonnons toutefois que des variations génétiques anciennes, notamment celles dues à des gènes dupliqués et des gènes sauteurs, ont réalisé le gros de la tâche. Les variants produits sont restés tapis dans le génome jusqu'à ce que de nouvelles occasions écologiques les aient rendus avantageux – par exemple, lorsque les cichlidés de rivières ont colonisé les grands lacs naissants. En puisant dans cette variation génétique ancienne, la sélection naturelle a pu créer des espèces adaptées à ces nouveaux habitats.

Nous pensons que les variations génétiques anciennes constituent la clé, parce que lorsque nous examinons les génomes de ces espèces de cichlidés, nous ne trouvons pas beaucoup de différences génétiques fixées. Autrement dit, il existe très peu d'exemples de gènes dont le même variant serait porté par tous les membres d'une même espèce. Au contraire, le génome d'une espèce conserve d'anciens variants, même après que les poissons se sont séparés de leurs ancêtres pour former une nouvelle espèce.

Ainsi, non seulement une jeune espèce conserve de l'ADN de ses ancêtres, mais cet ADN pourrait être encore suffisamment similaire à celui d'espèces proches pour qu'une hybridation viable et fonctionnelle (fertile) soit possible. Un tel mélange permettrait à de nouveaux variants géniques de traverser les barrières entre espèces – constituant un matériel génétique potentiellement utile et recyclable si nécessaire.

Plusieurs mécanismes génétiques en jeu : mutations, duplications de gènes, micro-ARN, gènes sauteurs...

La rétention d'une variation génétique ancienne, en plus d'alimenter une diversification rapide chez les cichlidés, expliquerait aussi comment les mêmes caractères extrêmement spécifiques sont apparus à de nombreuses reprises dans des lignées distinctes : les résultats de nos recherches suggèrent que des caractères tels que des mâchoires asymétriques ou des lèvres proéminentes ne sont pas apparus à partir de rien à chaque fois. Au contraire, les mêmes gènes et régulateurs de gènes auraient été mis à contribution de façon répétée. Toutefois, cette hypothèse doit encore être soumise à une vérification expérimentale.

Les mécanismes génomiques que nous décrivons ici ne sont pas les seuls moteurs de l'évolution des cichlidés. Des facteurs environnementaux ont certainement eux aussi joué un rôle crucial dans l'établissement des schémas et des vitesses de diversification dans ce groupe.

Les différences dans l'étendue de la diversité des cichlidés à travers le monde soutiennent cette hypothèse : en Afrique et au Nicaragua, les radiations qui surviennent dans des lacs aux habitats plus complexes (qui présentent par conséquent davantage de niches écologiques) comportent plus d'espèces que les radiations des lacs aux habitats plus simples.

Outre la spéciation survenue lorsque les cichlidés ont développé des spécialisations alimentaires pour occuper ces niches, une diversification supplémentaire s'est aussi produite à mesure que des différences de couleur sont apparues et que les femelles ont acquis des préférences pour des teintes particulières.

Il nous reste beaucoup à apprendre, mais, maintenant que nous disposons de génomes complets, ainsi que de nouvelles techniques puissantes pour les analyser, nos connaissances vont progresser rapidement. Je pense que les mécanismes qui expliquent la rapidité de la spéciation des cichlidés continueront à faire l'objet d'une recherche intense. Nous disposerons bientôt d'une compréhension bien plus fine du langage du génome et de l'ADN, et de la façon dont il relie tous les êtres vivants en même temps qu'il les distingue les uns des autres. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

D. Brawand *et al.*, The genomic substrate for adaptive radiation in African cichlid fish, *Nature*, vol. 513, pp. 375-381, 2014.

F. Henning et A. Meyer, The evolutionary genomics of cichlid fishes : Explosive speciation and adaptation in the postgenomic era, *Annual Review of Genomics and Human Genetics*, vol. 15, pp. 417-441, 2014.

A. Meyer et M. Stiasny, La naissance des espèces, *Pour la Science* n° 258, avril 1999.

explorez MARS

palais

DÉCOUVERTE

EXPOSITION jusqu'au 28 août 2016

® Champs-Élysées Clemenceau et Franklin-Roosevelt

En partenariat avec



Quelles pistes pour soigner la **DMLA** ?

Benjamin Wolff, Martine Mauget-Fajsse et José-Alain Sahel

À partir de 65 ans, la vision centrale d'une personne sur cinq se dégrade progressivement à cause de cette maladie de la rétine liée à l'âge. Les traitements actuels sont limités voire inexistantes pour la forme sèche de la maladie. Mais de nouvelles thérapies devraient bientôt changer la donne.

Dans les formes débutantes, les symptômes sont absents ou modérés. Les patients ressentent un besoin de plus de lumière pour lire ou se plaignent de récupérer lentement la vue après un éblouissement, ou lors du passage à l'obscurité. Parfois aussi, la vision des contrastes diminue ou celle des couleurs est altérée. Dans les formes avancées, les symptômes sont plus flagrants. La vue baisse, surtout de près. Des taches sombres apparaissent dans le champ visuel et les lignes droites paraissent déformées.

Fléau des pays où l'espérance de vie est longue, la dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA) est une maladie rétinienne complexe, chronique et évolutive. Elle est responsable d'une perte plus ou moins rapide de la vision centrale chez des personnes de plus de 50 ans. À partir de 65 ans, une personne sur cinq présenterait

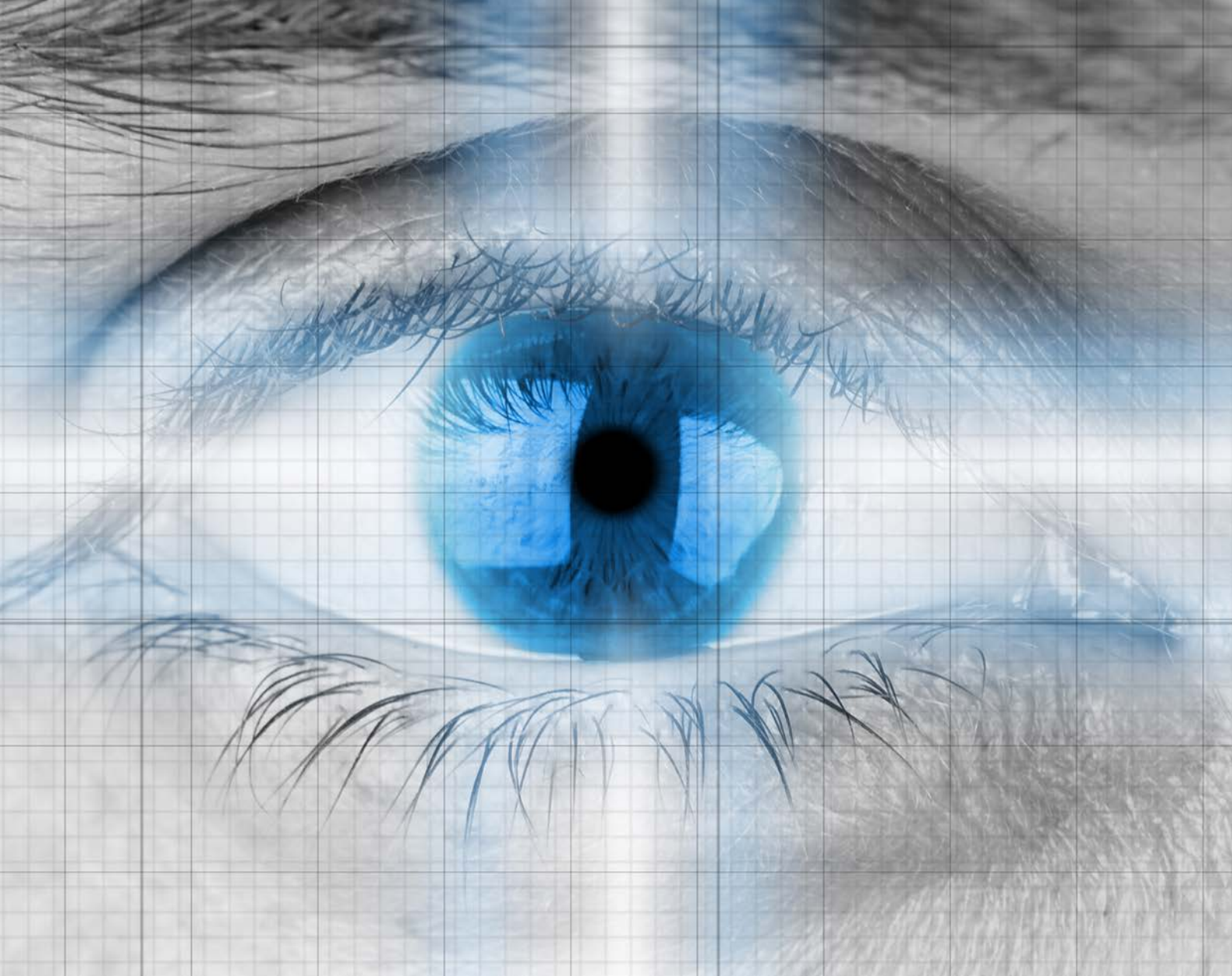
une DMLA. Dans les pays industrialisés, cette maladie est un problème majeur de santé publique et constitue un défi thérapeutique et économique. Avec l'allongement de l'espérance de vie, le nombre de cas pourrait augmenter de près de 50 % d'ici vingt ans.

On distingue plusieurs stades de DMLA. Tous sont dus à une altération de la rétine. Au cours du vieillissement, il arrive que de petits signes précurseurs apparaissent, que l'on désigne sous le nom de maculopathie liée à l'âge. La DMLA est une évolution pathologique de celle-ci, où l'on distingue trois formes – dites précoce, intermédiaire et tardive – en fonction de l'évolution de la maladie. Dans les formes précoce et intermédiaire, la vision centrale est encore épargnée, contrairement aux formes tardives. On différencie aussi deux évolutions principales de la maladie: la

forme sèche et la forme humide. La forme sèche ou atrophique, d'évolution lente, est liée à un amincissement progressif de la rétine dû à la disparition des cellules qui la constituent. Ce type de DMLA est le plus fréquent. La forme humide, dite exsudative ou néovasculaire, est moins fréquente, mais évolue plus vite et risque d'entraîner une perte de la vision centrale à court terme si elle n'est pas traitée ou traitée trop tardivement.

L'âge, le tabac, le régime alimentaire (obésité abdominale) et les antécédents familiaux sont les principaux facteurs de risque de la DMLA. Mais d'autres facteurs sont aussi évoqués, tels que le sexe féminin, les iris clairs, ainsi que l'hypermétropie, les maladies cardiovasculaires, l'hypertension artérielle, l'hypercholestérolémie.

Aujourd'hui, le besoin de trouver de nouvelles solutions thérapeutiques



pour cette maladie est impératif, en dépit des avancées spectaculaires ces dix dernières années, notamment pour les formes humides. Actuellement, le traitement de ces formes permet en effet de stabiliser au moins temporairement la vision chez 90 % des patients qui, jusqu'alors, étaient voués à une perte visuelle rapide. Néanmoins, ce traitement – des injections dans l'œil – est réalisé au prix de procédures lourdes pour les patients et coûteuses pour la société du fait du prix des produits injectés. Quant aux formes sèches, il n'existe encore aucun traitement efficace pour les enrayer. Mais de nouveaux espoirs sont apparus grâce d'une part à une meilleure compréhension des différentes formes de la maladie et, d'autre part, aux avancées en biologie, notamment en génétique, en immunologie et dans la recherche sur les cellules souches.

La rétine est l'organe sensible de la vision. Émergence du cerveau, cette mince membrane qui tapisse le fond du globe oculaire est le lieu où les messages lumineux reçus dans l'œil sont transformés en signaux nerveux que le cerveau interprète en images. C'est autour et dans la zone centrale de la rétine – la macula –, que la DMLA débute (voir l'encadré page 55). Plusieurs mécanismes interviennent dans son apparition.

Les méfaits à long terme du stress oxydatif

Pour fonctionner normalement, nos yeux consomment beaucoup d'oxygène, ce qui entraîne la libération de radicaux libres, des molécules qui ont gagné ou perdu un électron. Ces molécules, instables, se stabilisent en captant ou cédant un électron

à une molécule de leur entourage, ce qui propage l'instabilité. Les tissus oculaires sont très exposés à ce phénomène, nommé stress oxydatif. Et lorsqu'ils sont produits en excès, les radicaux libres s'attaquent aux cellules rétinienne. Dans la DMLA, le rôle du stress oxydatif a été largement démontré. Pour réduire l'action des radicaux libres, notre organisme produit des antioxydants en plus de ceux que l'alimentation apporte. Mais avec l'âge et sous l'effet de certains facteurs environnementaux (tabac, UV, pollution), cette production diminue, ce qui augmente le stress oxydatif et l'altération associée des cellules de la rétine. Une augmentation de l'apport alimentaire d'antioxydants aiderait à compenser ce manque et à retarder l'apparition de la maladie.

Un autre mécanisme est lié au renouvellement des cellules photosensibles

À long terme, l'ensemble de ces mécanismes, qu'ils soient liés au mode de vie ou à

En pratique, si vous percevez une déformation des lignes droites ou des taches sombres dans votre champ visuel, il faut consulter un ophtalmologiste rapidement (en moins de sept jours). On met facilement ces signes en évidence en regardant une grille (la grille d'Amsler), très utile pour

surveiller, *via* leur apparition (ou disparition), l'évolution de la maladie. Le diagnostic se poursuit par imagerie de la rétine.

Les progrès réalisés ces dernières années dans ce domaine ont considérablement amélioré les capacités de diagnostic et de suivi des patients souffrant d'une DMLA. Des photographies du fond d'œil permettent de visualiser les anomalies telles que des dépôts sous-rétiniens, des zones d'atrophie rétinienne ou des hémorragies. La tomographie à cohérence optique (OCT), un procédé d'imagerie non invasif, est aussi devenue un outil indispensable pour mesurer et surveiller l'épaisseur de l'épithélium rétinien, et traquer les anomalies dans les différentes couches de la rétine (voir l'encadré page 57).

De plus, la visualisation directe des photorécepteurs est aujourd'hui possible grâce à l'optique adaptative, une technique dont le principe physique, emprunté aux télescopes, permet de corriger en temps réel les aberrations optiques intraoculaires. Cette imagerie offre une analyse très fine

LES AUTEURS



Benjamin WOLFF exerce au centre ophtalmologique Maison Rouge à Strasbourg.



Martine MAUGET-FAYSSE est ophtalmologiste dans le service de José-Alain Sahel à la Fondation

ophtalmologique Rothschild, à Paris.



José-Alain SAHEL est directeur de l'Institut de la vision (UPMC/Inserm/CNRS) et chef de services

d'ophtalmologie au CHN0 des Quinze-Vingts et à la Fondation ophtalmologique Rothschild.

à l'échelle de la cellule (photorécepteurs, parois vasculaires) de la perte cellulaire au cours du vieillissement, mais présente l'inconvénient de n'explorer qu'une très petite partie du fond d'œil.

Enfin, on analyse de façon dynamique les vascularisations de la rétine et de la choroïde à l'aide de l'angiographie – l'imagerie par contraste de la circulation sanguine. Le contraste est obtenu en injectant des colorants (fluorescéine ou indocyanine) par voie intraveineuse. Grâce à l'angiographie, on détecte les néovaisseaux et on suit leur activité au cours du temps. La technique est invasive (elle nécessite une injection), mais une nouvelle génération de tomographie à cohérence optique, l'OCT-angiographie, est en train de supplanter l'angiographie classique. Elle permet d'observer et caractériser les vaisseaux rétiens et choroïdiens, et de suivre l'évolution des néovaisseaux sans avoir à injecter des produits de contraste.

Le diagnostic de la DMLA repose sur un faisceau d'arguments regroupant les

DE L'ŒIL À LA RÉTINE

Tapissant le fond de l'œil, la rétine est un tissu complexe constitué de différentes couches cellulaires. La partie la plus externe, exposée à la lumière incidente, contient les photorécepteurs – les cônes et les bâtonnets.

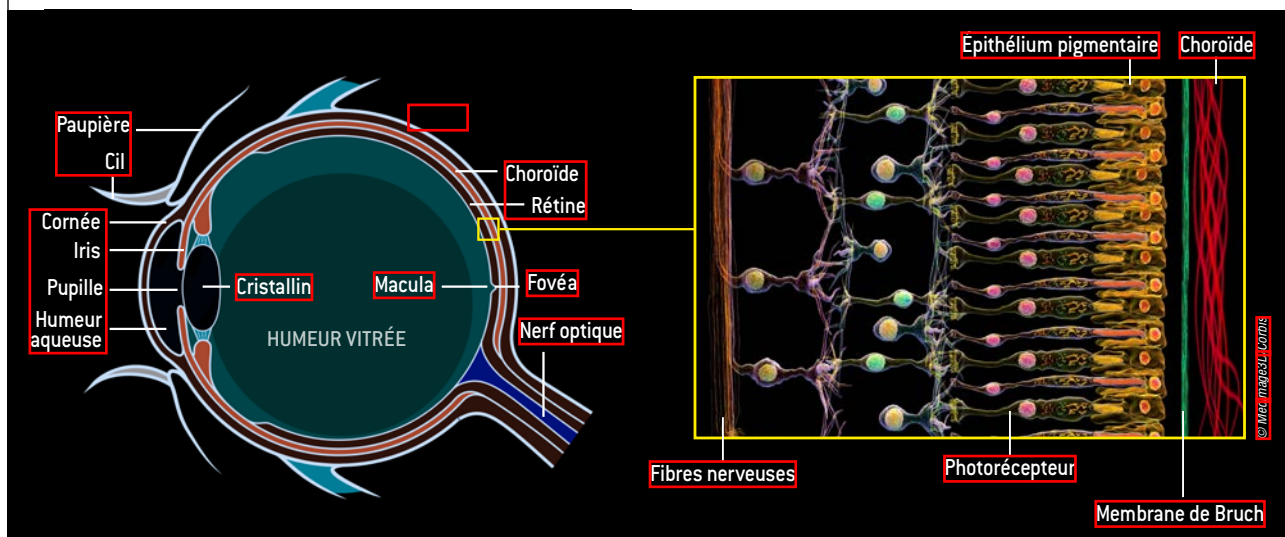
Ces cellules photosensibles transforment la lumière en un signal électrique envoyé au cerveau. Les cônes permettent de voir les détails des images et les couleurs. Les bâtonnets, eux, gèrent la vision nocturne. Les

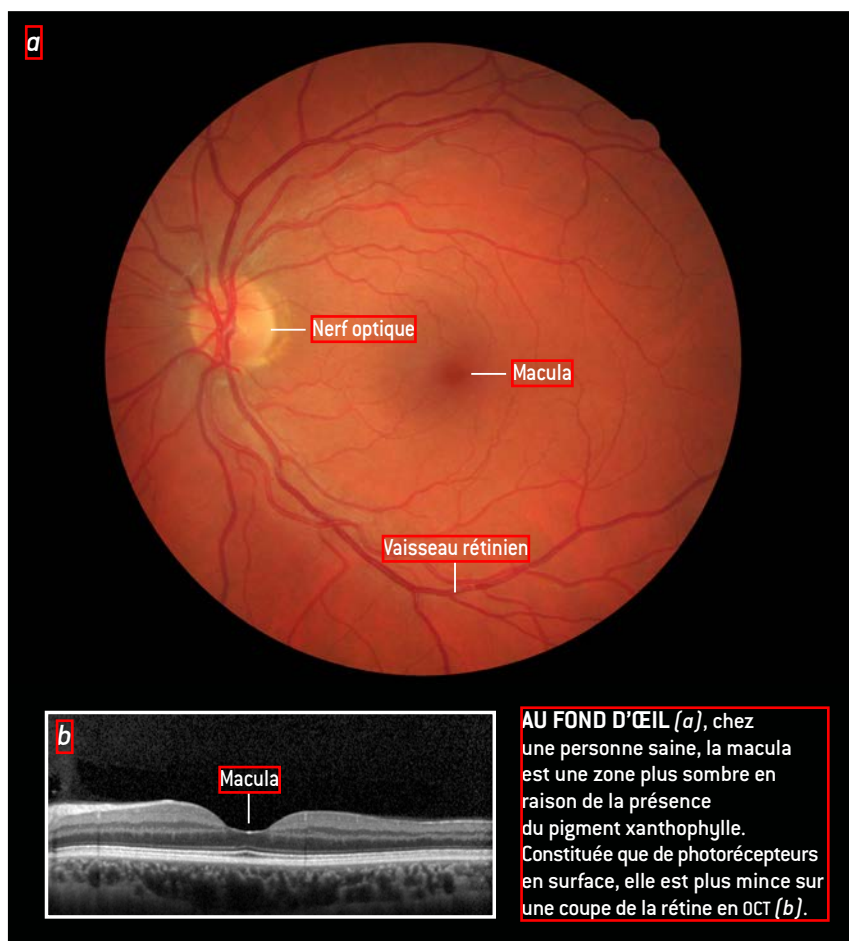
photorécepteurs reposent sur une autre couche cellulaire, l'épithélium pigmentaire, qui adhère fortement à une membrane, la membrane de Bruch. L'épithélium pigmentaire renouvelle en permanence les photorécepteurs

en phagocytant l'extrémité de ces cellules et en recyclant les éléments. Derrière la membrane de Bruch, un tissu de vaisseaux sanguins, la choroïde, assure l'apport d'oxygène et de nutriments nécessaires au fonctionnement des photorécepteurs.

La macula est la zone de la rétine située dans la partie centrale du fond de l'œil. On la nomme aussi « tache jaune », car elle contient un pigment, le

pigment xanthophylle (ou pigment jaune), qui joue un rôle protecteur contre les rayons lumineux toxiques. La macula contient principalement des cônes. Son centre, notamment – un creux, la fovéa, ne contenant que des cônes –, est l'endroit où la vision des détails est la plus précise. C'est en général dans et autour de cette zone centrale de la rétine, la plus exposée à la lumière, que la DMLA débute.





signes fonctionnels (les symptômes ressentis) et les signes cliniques observés lors de l'examen du fond d'œil, l'OCT et l'angiographie rétinienne (voir l'encadré page 58).

Un diagnostic précis de la forme de DMLA

Dans les formes débutantes, l'examen du fond d'œil est caractérisé par l'apparition de fins dépôts jaunâtres sous-rétiniens, les drusen, le plus souvent asymptomatiques ou peu symptomatiques. Néanmoins, les patients peuvent se plaindre d'éblouissement, de mauvaise vision des contrastes ou de besoin de plus de lumière pour lire (la lumière les éblouit, mais ils ne voient pas sans elle). L'OCT permet de visualiser les drusen et de les suivre régulièrement pour détecter une évolution vers un stade plus sévère.

La forme sèche de la DMLA se caractérise par des lésions d'amincissement de la rétine qui s'élargissent peu à peu et se joignent pour atteindre le centre de la

rétine. Au fond d'œil, ces zones d'atrophie apparaissent plus pâles que la rétine avoisinante. Dans les formes intermédiaires de DMLA, les zones d'atrophie n'atteignent pas la macula, contrairement aux formes tardives. L'OCT révèle la disparition des photorécepteurs de la macula. La forme sèche de la DMLA est responsable d'une baisse visuelle lente et progressive. En fonction de la zone de rétine atteinte, la perte visuelle est variable. Quand l'atrophie atteint le centre, des taches sombres apparaissent dans le champ visuel et le patient ne peut plus lire ni reconnaître les visages.

Dans la forme humide, la baisse visuelle est rapide et s'associe souvent à la perception d'une déformation des lignes droites ou de taches sombres au centre de la vision. Le fond d'œil met fréquemment en évidence la présence d'hémorragies sous la rétine. L'OCT identifie les altérations du tissu rétinien induites par les néovaisseaux. On détecte ainsi des soulèvements de l'épithélium pigmentaire ou la présence de liquide sous et à l'intérieur de la rétine. L'angiographie permet d'identifier avec certitude le néovaisseau. Il n'est pas rare, cependant, que les deux formes avancées de la DMLA, sèche et humide, coexistent.

Une alimentation riche en antioxydants

À l'heure actuelle, il n'existe pas de traitement efficace contre les formes sèches de la DMLA. Les thérapies utilisées pour lutter contre l'atrophie rétinienne visent à protéger les photorécepteurs par l'apport d'antioxydants, d'oméga 3 et de pigments maculaires – la lutéine et la zéaxanthine. Les antioxydants diminuent le stress oxydatif de la rétine. Les pigments maculaires ont pour fonction de filtrer la lumière bleue, la plus toxique pour la rétine, et diminuent eux aussi considérablement le stress oxydatif. Une supplémentation avec 10 milligrammes de lutéine et 2 milligrammes de zéaxanthine par jour a ainsi été recommandée en 2013 en conclusion de l'étude clinique Areds 2, coordonnée par une équipe de l'Institut américain de l'œil. Poursuivant et confirmant l'étude Areds 1 achevée en 2001, cette étude a montré une réduction de 24 % de l'évolution de la maladie après une supplémentation en vitamines (vitamine C, vitamine E, zinc, cuivre, lutéine et zéaxanthine) fortement dosées.

Forme humide : les traitements par injections intraoculaires permettent une stabilisation visuelle chez 90 à 95 % des patients

Une alimentation riche et variée est donc recommandée (voir page 60), associée à la lutte contre l'obésité abdominale et le tabagisme, qui favorisent le stress oxydatif. Le port de verres teintés semble aussi utile pour protéger l'œil des rayons lumineux toxiques pour la rétine.

Les résultats sur la supplémentation en oméga 3 sont moins clairs. L'étude Areds 2 n'a pas détecté de ralentissement de la maladie associé à une telle supplémentation. Mais à l'inverse, l'étude française NAT 2 a montré un rôle plutôt favorable des oméga 3 en utilisant une formule d'oméga 3 différente de celle de l'étude américaine (le DHA au lieu de son précurseur, l'EPA, préconisé par l'étude Areds 2). Dans le doute, on recommande donc de manger du poisson, riche en oméga 3.

Il n'est en revanche pas nécessaire de donner une supplémentation aux patients atteints de formes débutantes ou très avancées. Seule une alimentation équilibrée est recommandée dans ces cas, associée à la lutte contre les autres facteurs de risque.

La prise en charge des formes humides de la DMLA a quant à elle été profondément modifiée depuis l'avènement des traitements bloquant l'action du facteur de croissance VEGF. Utilisées en France depuis 2006, les injections périodiques de molécules anti-VEGF à l'intérieur de l'œil, dans la cavité vitréenne, constituent aujourd'hui le traitement de première ligne des formes humides. Les anti-VEGF stoppent la croissance locale des néovaisseaux et réduisent les effets délétères induits au niveau de la rétine (œdème, fibrose et hémorragies). Dans certains cas, ils entraînent même une régression des petits néovaisseaux.

Bloquer la formation des néovaisseaux

Deux anti-VEGF ont actuellement l'autorisation de mise sur le marché et sont remboursés par la Sécurité sociale: le ranibizumab (Lucentis®), un fragment d'anticorps qui bloque directement le facteur de croissance VEGF, et l'aflibercept (Eylea®), un récepteur synthétique de VEGF qui «leurre» le facteur de

croissance en le fixant puissamment et en l'empêchant ainsi d'atteindre son récepteur naturel dans les cellules.

Un autre anticorps bloquant le facteur VEGF et déjà largement prescrit en cancérologie, le bévacizumab (Avastin®), est aussi utilisé en injection dans la DMLA humide. Le 25 juin 2015, l'Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé a établi la recommandation temporaire d'utilisation d'Avastin® dans les formes humides de la DMLA, avec des restrictions et seulement en milieu hospitalier. Et en septembre 2015, un arrêté ministériel a autorisé la prise en charge du médicament par l'Assurance maladie. Plusieurs études internationales (dont une française) ont montré que le bévacizumab a une efficacité comparable à celle du ranibizumab.

Ces traitements par injections intraculaires permettent, avec des protocoles d'utilisation précis, un gain visuel chez 30 à 40% des patients et une stabilisation visuelle chez 90 à 95% des patients. Déterminés par l'ophtalmologiste pour neutraliser au mieux la production du facteur VEGF dans

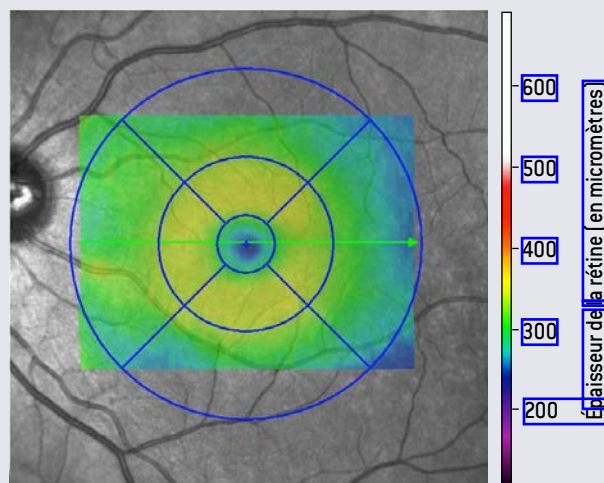
Mesurer l'épaisseur de la rétine au micromètre près

Depuis quelques années, la tomographie à cohérence optique (OCT) permet de suivre de façon précise l'évolution de la DMLA en mesurant l'épaisseur de chaque couche qui constitue la rétine. L'OCT est un procédé d'imagerie très performant, non invasif et en temps réel, comparable dans son principe à l'imagerie ultrasonore, mais fondé sur la réflexion d'un faisceau laser infrarouge.

De par sa structure et sa composition, chaque couche de cellules réfléchit le faisceau laser incident d'une façon particulière et, grâce à ces propriétés optiques, on distingue les différentes couches et leur épaisseur en scannant la rétine sur sa profondeur. On analyse ainsi le tissu rétinien avec une résolution de l'ordre de 5 micromètres. Le faisceau lumineux traverse les couches de l'œil et le dispositif mesure le temps mis par l'écho lumineux pour traverser les tissus oculaires avant d'être réfléchi (voir la figure ci-contre). L'OCT fournit ainsi des images de très haute résolution en coupe

orthogonale (voir la figure b page ci-contre), permettant une approche de type histologique des différentes couches de la rétine, à partir desquelles on mesure et surveille l'épaisseur rétinienne. On suit ainsi les anomalies induites par le vieillissement avec une excellente reproductibilité. L'OCT est devenu un outil indispensable pour le diagnostic et le suivi des différentes formes de la DMLA.

Récemment, une nouvelle génération de tomographie à cohérence optique, l'OCT-angiographie (OCT-A), a révolutionné l'imagerie rétinienne. Cette technique permet d'observer les



CARTOGRAPHIE de la macula chez un sujet sain en tomographie à cohérence optique. Plus la couleur est bleue, plus l'épaisseur est faible.

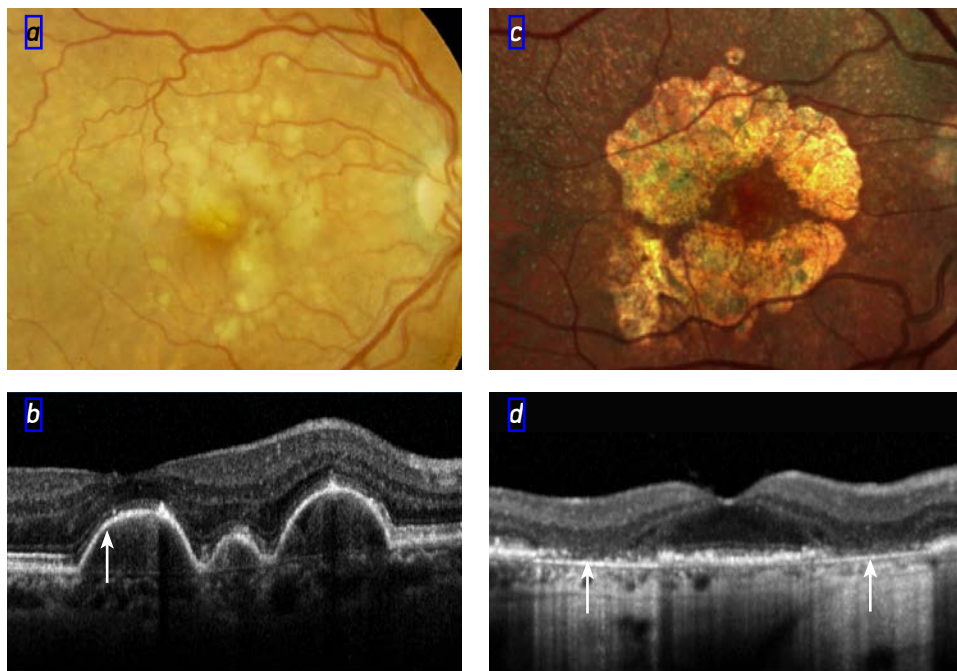
réseaux de vaisseaux sanguins de la rétine et de la choroïde sans avoir à injecter des produits de contraste. Fondée sur l'interférométrie dite speckle, elle détecte le flux dans les vaisseaux en comparant les motifs

d'interférences (les speckles) que produisent les éléments sanguins par rapport à l'environnement stable. L'OCT-angiographie permet de voir avec précision la présence de néovaisseaux et d'en suivre l'évolution.

COMMENT ON DISTINGUE LES FORMES DE LA DMLA

Le diagnostic de la DMLA repose d'une part sur les symptômes ressentis et, d'autre part, sur divers signes observés lors de l'examen du fond d'œil et de son analyse par tomographie à cohérence optique (OCT), souvent

accompagnée d'une angiographie de la rétine. L'apparition de dépôts jaunâtres sous la rétine (a), les drusen, aussi visibles en OCT (b), caractérise la forme débutante de la DMLA. Dans la forme sèche, le fond d'œil et l'OCT révèlent



AU DÉBUT DE LA MALADIE, des dépôts apparaissent sous la rétine à l'examen au fond d'œil (a), visibles sous l'épithélium pigmentaire en OCT (b). Dans la forme sèche de la DMLA, la zone d'amincissement rétinien est plus pâle que le reste au fond d'œil (c) et l'OCT montre la perte des photorécepteurs (d, flèches). Dans la forme humide, l'angiographie met en évidence les néovaisseaux qui apparaissent peu à peu au cours de la séquence angiographique, quand le produit de contraste les pénètre (e, à 15 secondes, et f, à 4 minutes, flèche). L'OCT montre le soulèvement de l'épithélium pigmentaire (g, flèche bleue) et du liquide sous la rétine (flèche blanche).

l'œil, ces protocoles d'utilisation dérivent de vastes études cliniques, réalisées dans de nombreux pays. Les patients reçoivent en moyenne sept injections par an et par œil traité, mais ce nombre varie beaucoup d'un patient à l'autre. Les traitements sont longs, coûteux et soumis à des surveillances régulières et rapprochées.

Des aides à la lecture

Moins spécifique et efficace, la thérapie photodynamique à la vertéporfine, qui fut le traitement de référence des formes humides de la DMLA de 2002 à 2007, conserve néanmoins une place pour la prise en charge de certaines formes réfractaires au traitement par anti-VEGF. Son principe repose sur l'injection intraveineuse d'un colorant photosensible qui, activé par une lumière d'une certaine longueur d'onde, entraîne une réaction photochimique dans la zone éclairée. Cette dernière y produit, en théorie, une occlusion des vaisseaux choroïdiens et une modification de leur perméabilité.

Il est à noter que l'opération de la cataracte chez les patients atteints de DMLA

n'a pas augmenté le risque d'évolution vers une forme sèche ou humide sur près de 1 000 yeux de patients de l'étude Areds 2.

Dans les formes humides et sèches très avancées avec perte quasi totale de la vision centrale, des équipements optiques fournissent une aide à la lecture, tels que des loupes autoéclairantes, des tablettes tactiles ou des téléagrandisseurs. Une rééducation dite basse vision – un entraînement à la vision excentrique – apprend aussi aux patients à se servir pour la lecture de leur vision périphérique, moins affectée. Les aides visuelles et les lunettes à protection latérale et à filtres sont d'ailleurs très utiles pour optimiser cette vision résiduelle.

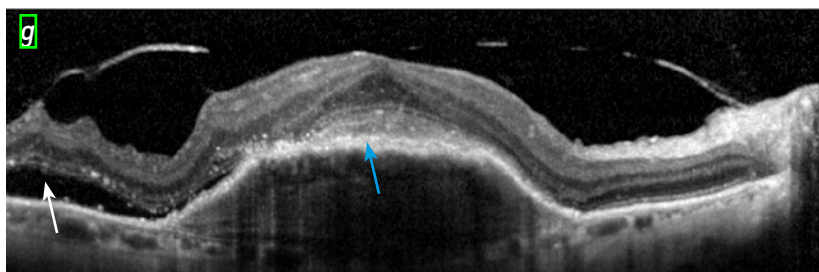
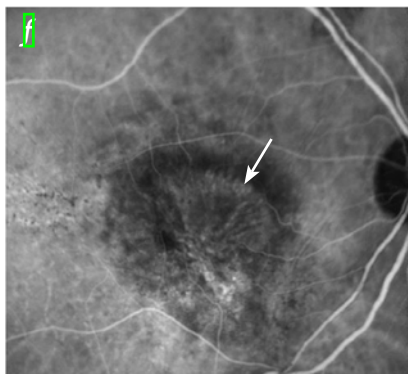
On le voit, malgré toutes les améliorations apportées ces dernières années, le traitement de la DMLA est encore loin d'être parfaitement satisfaisant. Mais les connaissances actuelles en génétique, en biologie moléculaire, en immunologie et en biochimie laissent entrevoir de nouvelles stratégies thérapeutiques, tant pour les formes humides que sèches de la DMLA.

Dans le cas des formes humides, on envisage des traitements adjuvants – des

traitements qui, associés à ceux bloquant la formation des néovaisseaux (l'angiogénèse), favoriseraient leur action au fil des différentes phases de l'angiogénèse. Plusieurs molécules très prometteuses sont à l'étude. En particulier, une molécule anti-PDGF est en essai clinique de phase III. Si l'essai est concluant, elle pourrait être mise sur le marché dans environ un an et demi.

La protéine PDGF est un facteur de croissance sécrété lors de la cicatrisation des néovaisseaux. Elle régule la formation de cellules – les péricytes – qui entourent les néovaisseaux et participent à leur stabilisation. Ce processus physiologique se produit dans tout l'organisme. Toutefois, les péricytes rendent les néovaisseaux moins sensibles aux traitements anti-VEGF. Or les traitements anti-VEGF prolongés induisent la production du facteur PDGF, ce qui diminue encore la sensibilité des néovaisseaux aux anti-VEGF. La molécule anti-PDGF vise à enlever ces péricytes pour rendre les néovaisseaux à nouveau sensibles aux anti-VEGF. Les études cliniques en cours ont montré une grande efficacité fonctionnelle de ce produit en association aux anti-VEGF.

les zones où l'épithélium pigmentaire s'est aminci (c, d). Dans la forme humide de la maladie, l'angiographie montre l'apparition de néovaisseaux (e, f) et l'OCT, le soulèvement de l'épithélium pigmentaire (g).



En revanche, l'irradiation par rayonnement ionisant de la zone néovasculaire, associée aux injections d'anti-VEGF, n'apporte pour l'instant aucun résultat fonctionnel favorable. Très utilisée dans les années 1990, cette technique avait été abandonnée en raison des complications importantes à moyen et long termes.

D'autres recherches sont en cours sur des anti-VEGF de plus haute affinité (DARPin, Conbercept, RTH258) qui permettraient de diminuer la fréquence des traitements. Des systèmes offrant une libération prolongée des médicaments, tels que des implants rechargeables ou biodégradables, sont aussi testés et réduiraient le nombre d'injections intravitréennes.

Enfin, quelques études portent sur des traitements qui ne nécessiteraient pas d'injection. Certaines sont menées sur des médicaments pris par voie orale, tel le X-82, un inhibiteur de tyrosine kinase qui bloque à la fois les facteurs de croissance PDGF et VEGF, ce qui lui confère un fort pouvoir anti-angiogénique. Une administration en gouttes est aussi testée avec une autre molécule, le

Une piste en plein essor est la recherche sur les greffes de cellules souches et d'épithélium pigmentaire

lactate de squalamine. Initialement isolée dans le foie et l'estomac d'un requin, la squalamine est un aminostérol ayant une activité antimicrobienne, antivirale, antifongique et antiangiogénique – elle inhibe divers facteurs de croissance des néovaisseaux, tels que le VEGF et le PDGF. La squalamine est notamment déjà utilisée en cancérologie pour son activité antiangiogénique.

De nouvelles pistes contre la forme sèche

Concernant la forme sèche de la DMLA, de nouvelles molécules sont à l'étude pour éviter la formation des drusen et l'évolution vers l'atrophie. L'objectif est de ralentir ou stopper la perte des cellules visuelles centrales. Une cible envisagée est un ensemble de protéines circulant dans le sang, rassemblées sous le nom de « système du complément » et impliquées dans l'inflammation.

Des études ont montré que le système du complément intervient dans la genèse de la DMLA. De fait, les différents mécanismes entraînant le vieillissement de la rétine conduisent à une réaction inflammatoire qui accélère la dégénérescence des photorécepteurs. Le complément contribue à cette étape en amplifiant la réaction inflammatoire. L'inhibition de certains éléments du complément (la fraction C5 et le facteur D) semble ralentir chez certains patients la progression des zones d'atrophie rétinienne. Des essais cliniques de phases I/II, voire III, sont en cours sur les premiers traitements visant à inhiber le système du complément.

Une autre piste en plein essor est la recherche sur les greffes de cellules souches et d'épithélium pigmentaire. Leur efficacité n'a pas encore été prouvée dans la DMLA, mais plusieurs résultats sont prometteurs. Depuis une dizaine d'années en effet, on sait reprogrammer des cellules somatiques (non reproductrices) prélevées chez l'homme (des cellules de la peau, par exemple) en cellules souches dites pluripotentes induites, c'est-à-dire capables de se spécialiser en certains types cellulaires, et de déclencher leur différenciation en cellules de l'épithélium pigmentaire et en précurseurs des cellules de la rétine. En poussant, ces nouvelles cellules s'organisent en des tissus comparables à ceux de la rétine. Elles pourraient ainsi être utilisées à l'avenir sous forme de greffe autologue (les cellules seraient

Que manger pour prévenir la DMLA ?

En prévention de la DMLA, on recommande une alimentation équilibrée, associée à la lutte contre d'autres facteurs de risque tels que le tabagisme, le cholestérol et l'hypertension artérielle. L'alimentation équilibrée à la fois prévient l'obésité abdominale, un facteur de risque important de la maladie, et fournit à

l'organisme trois familles de molécules protégeant contre la DMLA : les pigments maculaires, qui filtrent la lumière bleue, toxique pour les cellules, les oméga 3, qui interviennent dans la structure de la rétine, et les antioxydants, qui diminuent le stress oxydatif de la rétine. Voici quelques aliments qui en contiennent.

Les pigments maculaires



Chou frisé et vert
Épinards
Courge
Brocoli
Maïs
Œufs

Lutéine et
zéaxanthine

Les oméga 3



Fruits à coques
(noix, noisettes)
Huile de colza
Huile de pépin de raisin
Huile de noix
Huile de lin
Huile de soja

Origine
végétale

Poissons gras
(thon, espadon,
maquereau, sardine,
anchois)
Fruits de mer
Œufs (de poules nourries
en plein air ou avec
des graines de lin)

Origine
animale

Les antioxydants



Noix
Germe de blé
Olives (huiles végétales)
Grains de céréale
Laitue...

Vitamine E



Huîtres
Cresson
Céréales complètes
Champignons
Oignon
Jaune d'œuf
Noix
Brocoli
Hareng

Zinc



Agrumes
Baies
Chou
Pommes de terre
Légumes frais
Tomate
Acérola
Kiwi
Cassis...

Vitamine C



Raisin
Mûres
Cacahuètes

Resvératrol

L'injection intravitréenne

Actuellement, les formes humides de la DMLA, dues à une croissance anarchique de néovaisseaux dans la rétine, sont traitées par injections périodiques de produits dits antiangiogéniques, bloquant la croissance des vaisseaux (l'angiogenèse).

Le traitement se fait sous anesthésie locale de l'œil, en ambulatoire, par injection directe dans le vitré toutes les quatre à douze semaines selon les contrôles, pendant de nombreux mois ou années. Ce traitement présente un risque d'entraîner certaines complications,

dont la plus redoutée est l'infection endoculaire. L'injection nécessite donc des conditions d'asepsie rigoureuses et un contrôle rapide du patient doit être possible si besoin.

Avant l'injection, l'œil est ainsi lavé à la Bétadine®. Puis, après l'injection, l'œil

est éventuellement traité avec un collyre antibiotique ou antiseptique. Les complications susceptibles de survenir sont en général bénignes : des sensations de grains de sable sont relativement fréquentes, ainsi que des hémorragies sous la conjonctive ou l'apparition de bulles de gaz, qui disparaissent au bout de quelques jours. Dans de très rares cas, l'injection conduit à des complications graves, telles qu'une infection, un décollement de rétine ou une occlusion artérielle.

produites à partir de cellules somatiques du patient) pour traiter des maladies dégénératives de la rétine, notamment la DMLA. Plusieurs équipes dans le monde travaillent sur ce projet, notamment celle d'Olivier Goureau à l'Institut de la vision à Paris, qui a récemment développé un protocole simple pour produire de telles cellules.

Les premiers essais d'implants de cellules souches sont en cours. En 2015, Steven Schwartz, de l'université de Californie à Berkeley, et ses collègues ont montré, dans un essai clinique de phase I/II chez 18 patients, qu'à moyen terme un implant sous-rétinien de cellules souches d'origine embryonnaire survit et ne conduit pas à une prolifération anarchique ou à une activité biologique. Il faudra cependant encore de longues études avant de pouvoir appliquer cette technique dans la pratique courante.

D'autres approches, telles les stratégies de neuroprotection, visent à enrayer l'évolution de la dégénérescence rétinienne en interférant avec le cycle visuel afin de limiter l'accumulation de déchets toxiques (A2-E, lipofuscine) dans l'épithélium pigmentaire. Ces approches pourraient être associées à celles visant à restaurer la fonction visuelle. Les implants rétiens – des implants électroniques reliés à une caméra numérique – pourraient aussi devenir un traitement prometteur de la DMLA. Actuellement réservés à certaines dégénérescences rétiniennes héréditaires (rétinopathies pigmentaires), ils n'offrent pas encore une vision centrale suffisante pour être plus avantageux que la vision périphérique conservée par les

patients atteints de DMLA. Une augmentation de la résolution des images obtenues avec ces implants devrait permettre d'utiliser cette technologie dans le futur. La possibilité d'implanter une prothèse rétinienne dans des formes sèches avancées est au cœur d'intenses efforts de recherche et développement.

Des gènes de susceptibilité

La DMLA est une maladie chronique dont la prise en charge devrait s'améliorer encore, qu'il s'agisse des formes humides ou sèches de la maladie. Un des enjeux de cette prise en charge sera sans aucun doute la génétique. On sait aujourd'hui que des mutations sur plusieurs gènes codant des protéines de l'immunité (plus précisément des protéines du système du complément) sont des facteurs de risque de développer la maladie. Ces facteurs génétiques seraient en outre susceptibles d'aggraver le pronostic de la maladie. Ainsi, des mutations sur le gène *ARMS2* augmenteraient de deux à dix fois le risque de survenue d'une DMLA chez les personnes porteuses. Et chez un même individu, la présence de variants à risque sur trois gènes du complément (*CFH*, *ARMS2*/*HTRA1* et *C2*) multiplierait par 250 le risque de développer une DMLA par rapport à l'absence de variant à risque sur ces trois gènes. Au contraire, les individus porteurs de certains variants d'un même gène (la forme *apoE4* du gène de la protéine ApoE) auraient un risque deux à trois fois moins élevé de développer une DMLA.

L'analyse des gènes de susceptibilité renseignerait donc sur la sévérité de la maladie et aiderait à mettre en place le rythme de surveillance et les mesures de prévention de la DMLA. Le traitement des formes avancées serait aussi personnalisé avec un protocole de suivi et de traitement propre à chaque patient. Cela réduirait les coûts liés à la prise en charge de la maladie tout en améliorant le pronostic visuel des patients. La réalisation des tests génétiques n'est cependant pas encore aboutie. Les gènes impliqués dans la DMLA ne sont pas tous connus et leur analyse n'est encore possible que dans certains laboratoires. En attendant cette nouvelle ère de la lutte contre la DMLA, l'alimentation, la rééducation basse vision et les équipements optiques doivent garder une place de première importance dans la prise en charge des personnes atteintes. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Taskintuna *et al.*, Update on clinical trials in dry age-related macular degeneration, *Middle East Afr. J. Ophthalmol.*, vol. 23, pp. 13-26, 2016.

A. Agarwal *et al.*, Management of neovascular age-related macular degeneration : A review on landmark randomized controlled trials, *Middle East Afr. J. Ophthalmol.*, vol. 23, pp. 27-37, 2016.

R. Velez Montoya *et al.*, Current knowledge and trends in age-related macular degeneration : Genetics, epidemiology and prevention, *Retina*, vol. 34, pp. 423-441, 2014.

E. Y. Chew *et al.*, Lutein + zeaxanthin and omega-3 fatty acids for age-related macular degeneration: The Age-Related Eye Disease Study 2 (AREDS2) randomized clinical trial, *JAMA*, vol. 309, 2005-2015, 2013.

L'Amazonie, une terre promise pour

Stéphen Rostain

Sanctuaires de pierre, routes de 40 mètres de large, cités perchées sur d'imposants tertres de coquillages... De récentes fouilles révèlent le passé et la longue et riche histoire des Amazoniens, totalement méconnue jusqu'à ce jour.

L'ESSENTIEL

- L'Amazonie passe depuis longtemps aux yeux des Européens pour une forêt native difficilement habitable.
- En réalité, cette immense région est une mosaïque de paysages différents, ce qui explique son extrême biodiversité.
- Or l'archéologie révèle que la diversité culturelle de l'Amazonie a été à la mesure de cette diversité biologique.
- L'Amazonie apparaît ainsi de plus en plus comme un immense paysage culturel, siège de très nombreuses innovations dont nous profitons sans les savoir amazoniennes.

DES ENFANTS AMAZONIENS

contemplant un « trésor » de fragments de poteries archéologiques récupérés dans les environs de leur village du moyen Amazone.



l'archéologie

La plus vieille maison d'Amazonie...
 Jamais je n'aurais pensé la découvrir ainsi ! Nous étions, mon équipe et moi, en Équateur, au pied de la cordillère des Andes, en train de réaliser une prospection archéologique sous une pluie tenace. La grande plaine amazonienne s'étendait devant nous jusqu'à l'Atlantique et le capricieux volcan Tungurahua crachait sa colère. Absorbés par la puissance de ce paysage, nous n'aurions pas dû voir cette vague ombre à la surface d'un talus. Un mois de fouille plus tard, cet indice ténu se révéla être l'unique trace visible d'une maison plurimillénaire. Il s'agissait du foyer pavé de roches d'une cabane de bois, ovale, ainsi que le montrait la disposition de ses trous de poteaux, dont l'un a été miraculeusement préservé en anaérobiose sous le niveau de la nappe phréatique. Depuis, le radiocarbone nous a appris que cette maison familiale a été occupée il y a quelque 3 000 ans, ce qui en fait la plus ancienne jamais exhumée dans l'immense forêt amazonienne.

Cette découverte exceptionnelle s'inscrit dans le renouveau de la dynamique archéologique en Amazonie. Longtemps, l'idée qu'un environnement contraignant a empêché l'épanouissement des sociétés a dominé une archéologie amazonienne balbutiante. Menés aux quatre coins de l'immense Amazonie, les travaux récents d'archéologues de plus en plus nombreux ont au contraire mis en évidence que la grande forêt pluviale a constitué un milieu favorable à l'épanouissement culturel. C'est cette créativité considérable des anciens Amazoniens et la diversité culturelle qu'elle a produite dont il est question ici.

Stagnation culturelle ?

À propos de l'Amazonie, la science archéologique est longtemps demeurée bloquée sur l'idée émise dès 1854 par l'historien brésilien Francisco Adolpho Varnhagen : selon lui, les Amérindiens n'avaient pas d'histoire, seulement de l'ethnographie. Sous l'influence de ce préjugé, les archéologues n'étudiaient guère les restes de la vie ancienne en Amazonie, qui semblaient d'ailleurs peu gratifiants en comparaison des produits de l'archéologie andine. Ainsi, en 1971, la référence de l'archéologie amazonienne qu'est alors l'Américaine Betty Meggers (1921-2012), affirme une fois de plus dans son livre *Amazonie: Homme et*

L'AUTEUR



Stéphane ROSTAIN, directeur de recherche au CNRS, travaille dans l'UMR 8096 Archéologie des Amériques du CNRS et de l'université Paris I.

culture dans un paradis contrefait, que les basses terres infertiles de l'Amazonie ont été la cause de la stagnation culturelle des habitants. Cette position d'inspiration environnementaliste est alors celle de la plupart des chercheurs. Elle exerce jusque dans les années 1990 une influence stérilisante sur les archéologues, qui se contentent d'appliquer au passé les constatations faites en ethnographie.

Les premiers à la critiquer sont l'ethnologue Robert Carneiro, du Muséum de New-York, et surtout l'archéologue Donald Lathrap (1927-1990). Contrairement à Meggers, Lathrap pense que l'Amazonie centrale a été un foyer important de développement culturel. C'est sous son influence que certains archéologues américains, tels Anna Roosevelt et Clark Erickson, ont commencé à rejeter la méthode de l'ethnocomparatisme, dans les années 1980. Dans leur sillage, l'Américain Michael Heckenberger, le Brésilien Edouardo Neves et moi-même avons commencé à explorer la forêt supposée vierge, puis de plus en plus d'archéologues se sont mis à la fouiller sans œillères à mesure que les nations amazoniennes investissaient dans la recherche sur leur passé.

Aujourd'hui, tout un milieu archéologique de l'Amazonie existe. Il reste beaucoup à faire, mais une chose est

Le legs universel de l'Amazonie

Un énorme pan original de l'humanité a été effacé en quelques années par la conquête européenne, mais nous vivons encore avec son héritage, beaucoup plus riche qu'on ne le soupçonne. Ainsi, nous employons tous les jours des mots issus des langues amérindiennes amazoniennes comme ananas, cacao, canot, caoutchouc, cobaye, coca, hamac, maïs, papaye, tabac, topinambour, etc.

Une grande partie de notre alimentation trouve également son origine en Amérique du Sud. Le maïs, aujourd'hui première céréale mondiale, provient du Mexique, mais il a évolué aussi dans la grande forêt, de sorte qu'il en existe des variétés amazoniennes. Le cacao, toujours

plus consommé, est un produit clé de l'économie internationale et du cours de la Bourse, bien qu'il soit presque complètement encore cultivé par de petites unités familiales à travers le monde.

Enfin, se rappelle-t-on que les revues parisiennes de danseuses dénudées et

habillées de plumes sont une lointaine réminiscence des Amérindiens des basses terres sud-américaines ? Elles trouvent en effet leur origine dans l'impact provoqué devant la cour de France du XVIII^e siècle par la danse des Tupiniquins ramenés du littoral du Brésil. Impressionné par les ornements de plumes sur le bas du dos des Amérindiens, le Roi lança alors la mode des parures de plumes de nandu ou d'autruche. Le Lido et le Moulin Rouge ne sont finalement que les derniers avatars de cette élégance venue du « Nouveau Monde ».



CES QUELQUES FRUITS AMAZONIENS illustrent le grand rôle joué par l'Amazonie dans la domestication des plantes que nous utilisons couramment aujourd'hui. Ainsi, ci-dessus, on distingue une cabaça de cacaoyer (*Theobroma cacao*), qui, torréfiée, broyée et traitée, donnera du chocolat ; en haut à droite, le fruit de la grenadille (*Passiflora edulis*) qui, pressé, donnera du jus de fruit de la passion ; ci-contre le fruit d'un calebassier (*Crescentia cujete*) qui, une fois séché, servira de récipient. Plus de 83 espèces amazoniennes ont été domestiquées.

IMAG. J. P. S. / J. P. S.

déjà claire : l'Amazonie précolombienne constitue un univers d'une diversité inouïe, dont la richesse culturelle est à la mesure de la diversité biologique de ce continent forestier.

La canopée uniforme culminant à quelque 60 mètres suggère une nature puissante. En réalité, il s'agit d'un milieu fragile, où chaque plante et chaque animal a sa niche étroite, qui risque de disparaître au moindre déséquilibre. La complexité du milieu induit sa richesse : ainsi, on connaît en Amazonie plus de 16000 espèces d'arbres contre seulement 140 en France métropolitaine... Parallèlement, la multitude des plantes et champignons de toutes tailles qui se complètent à tous les étages de cet univers forestier et les myriades d'espèces d'insectes repérées expliquent que ce continent de verdure rassemble 15% des espèces végétales et animales du monde.

Pas étonnant que les premiers explorateurs européens aient cru reconnaître le paradis terrestre dans ce monde excessif,

tandis que d'autres ont voulu y voir l'enfer. En réalité, pour comprendre l'Amazonie, il faut garder à l'esprit ses proportions gigantesques et rejeter l'erreur consistant à la croire homogène. S'étendant sur quelque 7 millions de kilomètres carrés – soit la superficie de la mer Méditerranée, ou celle des États-Unis –, elle peut être divisée en de très nombreux bassins-versants, qui sont autant de mondes à considérer pour eux-mêmes, tant sur le plan biologique que sur le plan culturel.

Vingt affluents de plus de 1 500 kilomètres

Large de 300 kilomètres à son embouchure, le fleuve principal s'écoule sur environ 6400 kilomètres, soit presque autant que le Nil. Il a une vingtaine d'affluents totalisant plus de 1500 kilomètres. Le bas Amazone, dont la largeur dépasse 10 kilomètres, s'écoule en une journée davantage d'eau que la Seine pendant deux ans à Paris... Son

débit de 209000 mètres cubes par seconde représente 18% du total de l'eau douce fluviale parvenant dans les océans.

Cette démesure induit la grande diversité des milieux, dont résulte celle des cultures amazoniennes. De fait, la diversité culturelle reste très grande... Ainsi, on compte dans la forêt pas moins de 300 langues amérindiennes réparties au sein d'une soixantaine de familles linguistiques, de sorte que l'on peut estimer qu'il y en a eu plus du double à l'époque précolombienne.

On considère en effet que le choc viral et bactérien résultant de l'arrivée des Européens au XVI^e siècle a tué 70 à 90% des Amérindiens... Avant cette arrivée, il y aurait eu entre 5 et 7 millions d'Amazoniens se répartissant sur un territoire de la taille de l'Europe. Sans doute peut-on considérer que la population précolombienne était dense dans certaines vallées où vivaient des populations importantes d'agriculteurs, et faible dans la forêt

profonde que parcouraient des groupes de chasseurs-cueilleurs.

Le témoignage impressionnant du scribe de l'expédition espagnole menée en 1542 par Francisco de Orellana pour explorer l'Amazonie corrobore cette idée: « Nous nous dirigeons vers des îles que nous pensions inhabitées, mais lorsque nous les avons atteintes, les habitats qui s'offrirent à notre vue étaient si nombreux [...] que nous en avions les larmes aux yeux. » Francisco de Orellana, qui nomma

l'Amazonie, et ses hommes furent ainsi probablement les seuls Européens qui virent les grandes cités de l'Amazonie interne avant l'effondrement de leurs brillantes cultures.

À quoi ressemblaient-elles ? Michael Heckenberger, de l'université de Floride, a pu les reconstituer dans le haut Xingu, au Brésil: comme le suggère ce qu'ont vu les membres de l'expédition espagnole de 1542, elles prenaient la forme de groupes de maisons familiales en bois reliés aux

villages voisins par de nombreuses routes bordées de champs.

Ces cultures, seule l'archéologie pourra les restituer en partie ! Or, depuis le début de ce siècle, elle a déjà produit des résultats clés. Les archéologues les ont obtenus en s'associant aux géologues et aux botanistes qui exploraient la forêt. C'est ainsi qu'est vite apparu à quel point l'Amazonie n'est pas un milieu uniquement hostile, mais aussi un milieu aménageable tant par les chasseurs-cueilleurs que par des communautés

LES DISCRETS MONUMENTS AMAZONIENS

Les Amazoniens précolombiens ont laissé de nombreuses structures dans la forêt et les savanes qu'ils occupaient. Le plus souvent, il s'agit d'habiles terrassements conçus pour

installer des habitats à l'abri des fréquentes inondations, mais il peut également s'agir d'ouvrages de défense, de champs aménagés, de réseaux de drainage, de barrages, de routes...



d'agriculteurs. Petit à petit, il s'est révélé que l'Amazonie est faite de nombreux paysages culturels – c'est-à-dire remaniés par l'homme – et qu'elle a été l'origine d'innovations si importantes que l'humanité en profite tous les jours aujourd'hui. S'agissant de plantes domestiquées, qui se doute par exemple que le tabac, l'ananas, le manioc, la patate douce, le cacao, le piment, etc. viennent d'Amazonie ?

Plus de 83 plantes natives d'Amazonie y ont été domestiquées à des degrés divers.

Un cas particulièrement étonnant est celui du cacao, que l'on pensait domestiqué au Mexique. C'est ainsi que sur le site de Santa Ana/La Florida, au piémont des Andes équatoriennes, l'archéobotaniste Sonia Zarillo de l'université de Calgary a identifié la présence de cacao dans des bols de pierre et des jarres de céramiques vieilles de 5 300 ans, soit 1 500 ans avant la première attestation de cacao en Amérique centrale. Un autre cas stupéfiant est celui du manioc. Comment, en effet, des

populations entières en sont-elles arrivées à fonder leur régime sur un tubercule vénéneux, puisqu'il contient de l'acide cyanhydrique ? Avant de pouvoir le consommer, toute une série d'opérations complexes est nécessaire : épluchage, râpage, essorage, tamisage et cuisson. Pour les accomplir, les Amérindiens ont inventé des outils élaborés de pierre, de céramique et de vannerie.

Or les archéologues et les archéobotanistes qui travaillent en Amazonie se sont rendu compte qu'aux époques anciennes, cette plante était nettement moins commune que le maïs, puisqu'elle n'a connu une diffusion globale qu'au lendemain de la conquête européenne. D'où une hypothèse intéressante : le manioc aurait été adopté par défense. L'arrivée des conquérants européens provoquant la fuite de groupes entiers, il a fallu se protéger des voleurs errants sans ressources. Quoi de mieux pour cela de remplir ses champs avec une plante naturellement toxique ?

Le maïs nourrissait la forêt précolombienne

Le fait que le maïs ait été cultivé massivement dans la grande forêt amazonienne aux époques précolombiennes doit être souligné : cette céréale est en effet assez productive et nutritive pour nourrir des populations importantes, ce qui est un autre indice de la disparition des grandes sociétés précolombiennes.

Clairement, leur évolution a commencé tôt. J'évoquais au début de ce texte la découverte insigne d'une maison amazonienne vieille de 3 000 ans. Les quelques tessons de poterie qui s'y trouvaient poussent à se demander quand cette innovation cruciale pour le stockage et la cuisson, donc pour la vie des populations, s'est introduite dans l'immense bassin amazonien.

Traditionnellement, la poterie américaine était censée avoir été inventée à Valdivia, sur la côte pacifique d'Amérique du Sud, vers 3 500 avant notre ère. Cette certitude a pourtant été mise à mal lorsqu'on découvrit qu'elle existait déjà dans le bas Amazone depuis le VI^e millénaire. En effet, dès 5 600 avant notre ère, les occupants de la grotte de Pedra Pintada, dans la région de Santarém, façonnaient des marmites de terre. Plus tard, ce furent les pêcheurs-collecteurs vivant sur des tertres de coquillages (*cliché 6 ci-contre*) le long de la côte Atlantique qui ont utilisé



1 Les centaines de monticules de la vallée de l'Upano en Équateur auraient accueilli des résidences claniques ; elles étaient interconnectées par de larges chemins creux ; cette puissante culture a disparu sous les cendres du volcan Sangay.

2 Le terreau miraculeux de fertilité d'Amazonie, la *terra preta*, est le produit de denses occupations humaines pluriséculaires.

3 Dans les terrains marécageux, des buttes artificielles permettaient de cultiver le maïs.

4 L'un des « Stonehenge » brésiliens, un site énigmatique dont on sait qu'il a été une nécropole. On pense qu'il a pu aussi être un observatoire rituel.

5 Ce grand monticule, édifié à l'aide de coquillages par d'anciens Amazoniens, leur servait à se prémunir contre les inondations fréquentes de leur territoire.

6 Ce tertre, situé sur l'île inondable de Marajó, a accueilli l'un des villages de la fameuse civilisation de Marajóara, connue pour ses énormes urnes funéraires anthropomorphes.

7 Occupant des plaines herbeuses inondables, les habitants des Llanos de Monjos installaient leurs villages sur des monticules qui ont résisté au temps.



© TS4/OSB/PH. ROSSETTI/PHOTOFEST/AMAZONIA, CENTALE-3/GETTY IMAGES/SCIENCE PHOTO LIBRARY/PHOTOFEST/AMAZONIA

la terre cuite. La poterie a ensuite connu un glorieux destin sur tout le continent : on en trouve dans tous les sites multimillénaires que l'on fouille.

La plupart des innovations techniques

de ce monde avant tout végétal n'ont malheureusement guère laissé de traces. Cependant, certaines des innovations les plus vitales ont traversé les siècles. Il en est ainsi de la vannerie d'arouman (*Ichmosyphon arouma*, un roseau local), qui partout en Amazonie permet de confectionner des outils hautement techniques : ici un manchon élastique pour exprimer le jus vénéneux du manioc, là un panier bien étanche composé de couches de vannerie intercalées de feuilles imperméables, là encore des nasses à poissons, des hottes de portage ou même une vannerie incorporant des fourmis à mandibules coupantes utilisées pour initier les adolescents !

La chasse n'ayant pas disparu avec l'arrivée des Européens, la sarbacane nous est aussi parvenue. Cette arme assez commune en Amazonie envoie de petits dards chargés en curare, une substance paralysante que les Amazoniens ont appris à maîtriser. Dans le touffu couvert végétal, la sarbacane est idéale pour immobiliser silencieusement plusieurs animaux de suite, des singes par exemple. Elle permet aussi de ne pas abîmer les oiseaux, dont les plumes étaient très appréciées des Amazoniens pour se confectionner des coiffes rituelles.

Quatre chevaux auraient pu trotter de front sur les anciens chemins de Guyane

Le hamac en fibres ou en coton – car les Amazoniens tissaient le coton – nous est aussi parvenu tant il est irremplaçable pour dormir dans un monde où l'on ne peut guère s'asseoir sur le sol tant il grouille de formes de vie urticantes ou pire. Dès sa découverte par les Européens, il fut adopté et a joué dès lors un rôle essentiel dans les marines occidentales, puisqu'il évitait aux marins de se retrouver le matin couverts de morsures de rats, de poux, de punaises...

D'autres inventions méritent l'attention. Ce sont par exemple les techniques de pêche et d'élevage du poisson : barrages à goulot équipés de nasses élaborées, piscines d'é-

vage de poissons.

Sur le plan social, les attestations de références mythologiques stables à travers les cultures amazoniennes sont précoces. Ainsi, c'est au pied des Andes, sur le site de Santa Ana/La Florida, que l'on trouve les premières représentations élaborées d'êtres mythiques et d'esprits animaux, plusieurs siècles avant d'apparaître dans le monde andin. Plus encore, l'ethnologue Dimitri Karadimas, de l'EHESS à Paris, a tout récemment démontré comment les mythes amazoniens actuels permettent d'interpréter de façon convaincante les dessins des poteries et des tissus précolombiens des cultures de la côte et de la cordillère. Cette constatation implique que, loin d'avoir été un monde impénétrable replié sur lui-même, l'Amazonie rayonnait.

LES FOUILLES LIVRENT

les traces d'un passé de plus en plus divers. À droite, une sépulture par inhumation sur le site de Hatahara dans le moyen Amazone, datant de l'an 1000 environ. À gauche, l'un des fouilleurs de ce même site décape un sol devant une épaisse paroi de *terra preta* mêlée de tessons de poterie.



De fait, elle n'a pu être si fermée que cela, puisque l'on pouvait s'y déplacer facilement. Les premiers chroniqueurs décrivaient de larges sentiers traversant la région des Guyanes, tandis que les Amérindiens d'aujourd'hui continuent à circuler sur des pistes séculaires. Au pied des Andes, il existe d'impressionnants chemins creusés connectant plusieurs sites archéologiques et les habitants locaux empruntaient encore récemment des *culuncos*, ces étroites et profondes tranchées descendant de la cordillère.

Ainsi, contrairement à une opinion courante, les habitants de la forêt tropicale n'étaient pas uniquement d'infatigables navigateurs des rivières. Beaucoup se déplaçaient plutôt en marchant le long des innombrables chemins reliant les villages. Par exemple, les explorateurs européens ont découvert dans l'intérieur de la Guyane de très larges chemins « sur lesquels auraient pu trotter quatre chevaux de front ». Michael Heckenberger a montré dans les années 2000 qu'il existait dans le haut Xingu un réseau de larges routes. Typiquement, elles partaient en étoile de chaque grand village pour rejoindre les autres. Certaines mesuraient jusqu'à 40 mètres de large !

Un paysage manipulé

En réalité, c'est bien l'ensemble du paysage qui a été manipulé, modifié et adapté par l'homme. Les groupes nomades de chasseurs-cueilleurs, les petits paysans mobiles occasionnels ou les grandes sociétés urbanisées – celles-ci ayant toutes cohabité à l'époque précolombienne – ont contribué à façonner le paysage que nous observons aujourd'hui, de la cime des arbres aux profondeurs du sol. Les manipulations de plantes des nomades et les activités des cultivateurs ont fini par modifier la composition végétale d'une grande partie de la forêt. Bien que parfois centenaires, voire millénaires, les effets de cette anthropisation du couvert de verdure se poursuivent jusqu'à aujourd'hui et sont encore observables, par exemple, dans certaines associations d'espèces.

On a souvent parlé du capital carbone de l'Amazonie, car sa végétation absorbe et stocke une quantité phénoménale de dioxyde de carbone. Les changements globaux et l'intense déforestation affaiblissent aujourd'hui de plus en plus cette fonction.



LA SARBACANE, arme très précise, est adaptée dans une forêt touffue, car à la différence du fusil, elle n'émet aucun bruit, ce qui permet de tirer successivement sur plusieurs proies à la suite, des singes par exemple.

BIBLIOGRAPHIE

S. Rostain, *Amazonie. Un jardin naturel ou une forêt domestiquée*, Actes Sud/Errance, 2016.

M. Heckenberger, *Les cités perdues d'Amazonie*, *Pour la Science*, n° 388, 2010.

C. C. Mann, 1491. *Nouvelles révélations sur les Amériques avant Christophe Colomb*, Albin Michel, 2007.

Collectif, *Brésil indien : Les arts des Amérindiens du Brésil*, Réunion des Musées Nationaux, Paris, 2005.

Néanmoins, on s'est récemment aperçu que le sol amazonien aussi capture du carbone. Ce sont les fameuses *terra preta* ou terres noires anthropiques, qui résultent d'intenses occupations humaines successives durant de longues périodes. Dans ces milieux anthropisés tropicaux, l'accumulation de déchets culinaires, de charbon de bois et d'autres microrestes humains a formé un sol très particulier. Tel un terreau confectionné, il est d'une fertilité exceptionnelle qui contraste remarquablement avec les terres acides pauvres des alentours. Les *terra preta* se trouvent principalement le long de l'Amazonie et de ses grands affluents et couvrent quelque 3 % du bassin amazonien, donc une surface considérable à l'échelle amazonienne.

Les habitants précolombiens n'ont pas seulement modifié les qualités de la couverture végétale et du sous-sol, mais aussi le modelé du sol. Ils ont creusé partout et construit de multiples structures de terre, redessinant parfois entièrement leur territoire. Ce sont des tertres d'habitat isolés ou des complexes de monticules, d'innombrables étendues de buttes agricoles, des chemins surélevés, etc. Bien plus, certaines savanes inondables ou vallées ont été complètement aménagées avec des structures domestiques, funéraires, cérémonielles ou autres.

Par exemple, le long du piémont oriental des Andes, l'étroite vallée amazonienne de l'Upano a presque entièrement été sculptée par les précolombiens pour élever des centaines d'assises rectangulaires d'habitat et creuser des routes les connectant. C'est un couloir d'environ 50 kilomètres de long et 10 kilomètres de large qui a ainsi été profondément organisé par les précolombiens.

Dès lors, se demande-t-on, vers où va la recherche archéologique en Amazonie ? Elle devient de plus en plus technique, tant aux petites qu'aux grandes échelles. Ainsi, les archéologues en sont à exploiter l'imagerie radar (obtenue par lidar aéroporté) afin d'inventorier les structures sous-jacentes à la forêt, notamment une multitude de terrassements. Aux petites échelles, les archéologues traquent le grain d'amidon, le phytolithes et le collagène afin d'identifier les plantes cultivées et les régimes alimentaires des anciens Amazoniens. Loin d'être simple, cette collecte de données contribue au grand tableau pointilliste du riche passé culturel de la forêt, qui se dessine peu à peu. ■

Paul Helbronner, le métronome de l'inutile

Daniel Léon

L'ESSENTIEL

- À la fin du XIX^e siècle, Paul Helbronner, polytechnicien et docteur ès sciences mathématiques, choisit la montagne comme terrain d'expression.

- Il doit en grande partie sa vocation à Henri Vallot, éminent membre d'une dynastie qui a réformé la cartographie de montagne et qui fut son maître.

■ **Sa vie, ses travaux,**
mais aussi ses fresques
panoramiques
aquarellées et
son impressionnante
collection de
photographies, parmi les
plus riches et originales
de l'histoire des Alpes,
font aujourd'hui l'objet
d'un magnifique ouvrage
aux éditions Glénat.



Entre 1903 et 1928, ce géodésien aujourd'hui oublié a gravi plus de sommets que quiconque dans les Alpes françaises. Avec une touchante obstination, il a mesuré le moindre recoin du massif... alors que de nouveaux instruments allaient bientôt rendre son travail obsolète. Restent ses magnifiques aquarelles et son immense collection de photographies.

CETTE AQUARELLE de Paul Helbronner est un extrait du tour d'horizon complet du Pelvoux peint entre 1902 et 1903 d'après un panorama photographié depuis la pointe Durand, à 3 932 mètres d'altitude. Au premier plan, la pointe Puiseux.

Je me force à prendre du café et je repars. Cette fois je me promet [sic] d'y arriver. En effet, après deux heures et demi très pénibles, je foule [la cime] du Mont Blanc [...] Vue idéale. Pas un brouillard. Pas un nuage. Splendide horizon blanc des glaciers. [...] Je rends le peu de choses que j'ai prises au sommet, grande jouissance à vomir. Je m'étends dans une couverture au soleil.

Il est 9 h 35 le dimanche 26 juillet 1891. Après une journée et une nuit aux prises avec un vent terrible, un jeune homme savoure sa première grande ascension, le mont Blanc. Paul Helbronner découvre la haute montagne et, au cours de ce premier long séjour alpin, sa vocation : il décrira et cartographiera les sommets des Alpes avec une précision inégalée. Il s'emploiera à cette mission pendant un quart de siècle, engrangeant au fil des expéditions carnets d'observations, publications, photographies et aquarelles panoramiques... Si l'avènement de la géodésie par photographie aérienne a éclipsé ses travaux, ceux-ci s'inscrivent dans l'histoire des grandes expéditions qui ont construit cette discipline.

Un oncle géologue

L'histoire d'Helbronner commence le lundi 24 avril 1871. À Paris, une nouvelle semaine débute avec la nomination de Frédéric Courmet à la tête de la Sûreté générale, qui vote en faveur de la création du Comité de salut public. Napoléon La Cécilia accède au grade de général dans l'armée insurrectionnelle. Paris traverse l'ère troublée de la Commune, qui s'achèvera un mois plus tard lors d'une semaine sanglante. Parisiens, Horace Helbronner et son épouse Hermance ont fui l'enfer et vivent temporairement à Compiègne, où leur aîné, Paul, pousse son premier cri.

L'avenir s'annonce brillant pour le jeune garçon. Il pourrait devenir avocat, comme son père, membre éminent du barreau de Paris. Ou bien, qui sait, artiste ? Les œuvres de sa mère, peintre de renom, ont déjà fait l'objet d'expositions. À moins qu'il n'hérite du talent plus singulier de son grand-père Rodolphe ? Ce dernier, installé à Londres, s'est spécialisé dans la confection de robes décorées de fleurs artificielles, fort prisées des *ladies* de l'aristocratie victorienne. Mais le sort le conduit sur une autre voie. En 1880, la maladie emporte Horace à 37 ans. Hermance, avec quatre enfants en bas âge, s'occupe en priorité des trois plus jeunes,



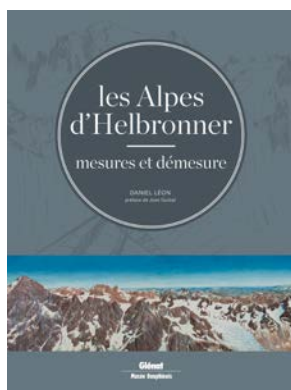
PAUL HELBRONNER, en 1921, sur la pointe Durand, au Pelvoux, dans le massif des Écrins. Un signal en pierre y a été érigé pour faciliter la visée du sommet lors des mesures de triangulation à partir des sommets voisins. Une étape indispensable du projet de cartographie du géodésien.

L'AUTEUR



Daniel LEON est journaliste, auteur et traducteur de nombreux ouvrages sur l'histoire

de la montagne aux éditions Glénat, dont *La Photographie à l'assaut des Alpes* (2006).



De nombreux documents inédits – correspondances, carnets, croquis – sont rassemblés dans le livre de Daniel Léon *Les Alpes d'Helbronner* (Glénat/Musée dauphinois, 2015), au fil du récit de la vie du géodésien. L'ouvrage est accompagné d'une sélection de panoramas grand format d'Helbronner – photographies et aquarelles – et de tirés à part.

et Paul devient le protégé de sa tante Henriette et de son mari Auguste-Michel Lévy.

Major de l'École polytechnique en 1864 puis ingénieur des Mines, cet « oncle Lévy » influence directement le destin de Paul. Parmi d'autres fonctions, il travaille en effet à l'élaboration de la carte géologique de la France. En 1883, une mission le mène dans la région de Clermont-Ferrand, dans le Massif central. Paul l'accompagne. Les versants moutonnés des volcans endormis composent le premier tableau montagnard de l'adolescent. Il en gardera un souvenir ardent d'admiration des spectacles de la nature et l'évoquera souvent bien des années plus tard, lors de ses propres campagnes en altitude dans les Alpes.

En grandissant à Paris, Paul révèle de nouveaux talents, dont le dessin et la photographie, et poursuit de brillantes études. La géographie fait partie de ses matières favorites. Sportif accompli – il pratique l'équitation et l'escrime –, Helbronner fréquente l'école Monge (aujourd'hui lycée Carnot), où un jeune professeur de 25 ans, Pierre de Coubertin, pas encore rénovateur des Jeux olympiques modernes, lance en 1888 un programme de modernisation de l'enseignement du sport. L'année suivante, Auguste-Michel Lévy repart avec son neveu pour des travaux en montagne. Direction Chamonix, capitale mondiale de l'alpinisme, au pied du massif du Mont-Blanc hérissé de sommets prestigieux. Un grand spectacle qui marque le jeune homme, auteur à 18 ans de clichés remarquables, notamment ceux des glaciers des Bossons, d'Argentière et bien sûr de la mer de Glace.

Alors Helbronner revient chaque année. Il monte toujours plus haut et ne perd pas de temps. Dès 1890, il dépasse les 3000 mètres d'altitude pour atteindre le site des Grands-Mulets, alors sur la voie d'ascension la plus employée pour gravir le mont Blanc. Où sa vocation s'affirme. Où il décide, justement, de mettre le mont Blanc « au programme de mes courses de 1891 ». Et le 26 juillet 1891, il se tient fièrement sur le culmen du massif et des Alpes occidentales. À 20 ans, Helbronner s'octroie donc le mont Blanc. Mais il fait bien plus que cela.

Sur le parcours, il s'est arrêté à la cabane Vallot, refuge précaire égaré dans l'immensité blanche de l'arête des Bosses, à plus de 4300 mètres. Juste à côté de l'observatoire du même nom, construit par Joseph Vallot. Celui-ci œuvre avec son cousin Henri, qui sera à l'origine d'une carte du massif au 1/20 000, une échelle d'une précision impensable à l'époque. À 20 ans, Helbronner obtient son diplôme d'alpiniste. Il comprend surtout combien ce lieu unique pourrait nourrir une vocation naissante. À 20 ans, il n'est pas encore cartographe, ni géodésien, mais le cours de sa vie change.

Même son admission à l'École polytechnique en 1892 ne l'empêche pas de passer ses étés au Mont-Blanc. Grâce à Henri Vallot, sa formation s'accélère. Il apprend la photographie, mais également la topographie

en levant des plans dans la vallée et en se familiarisant avec les instruments (règle à calcul, éclimètre, théodolite...), sans jamais oublier de représenter son environnement à l'aide de croquis précis et de dessins déjà

À moins que ce ne soit l'inverse... En est-il conscient ? Peut-être, car il décide de les immortaliser. Et d'une manière déjà méthodique qui annonce le géodésien. Il fait de la cime son pôle, d'où son appareil, libre de tout obstacle, fixe à 360 degrés, l'une après l'autre, toutes les montagnes environnantes. Helbronner signe ainsi son premier tour d'horizon photographique – selon sa propre formule –, qui sera suivi de centaines d'autres au début du

siècle suivant.

Mais une parenthèse s'ouvre. S'il continue de fréquenter le Mont-Blanc – où d'autres panoramas photographiques voient le jour en 1894, depuis le col du Géant, le mont Maudit, les aiguilles du Moine et du Tour –, s'il s'aventure en Suisse et en Italie jusqu'aux Alpes orientales, Helbronner poursuit ses études après l'École polytechnique et sort lieutenant de l'école d'application de l'artillerie et du génie de Fontainebleau. Mais par le biais d'une correspondance incessante avec Henri Vallot, nous savons qu'il échafaude désormais un grand projet : revoir totalement la cartographie des Alpes. Ne négligeant rien, il se constitue une bibliothèque spécialisée de premier ordre, se procure cartes et plans du monde entier. Et quand il épouse Hélène Fould le 8 février 1898, c'est la providence qui frappe à sa porte. Car la fille d'Alphonse Fould, fondateur

Les travaux

d'Helbronner

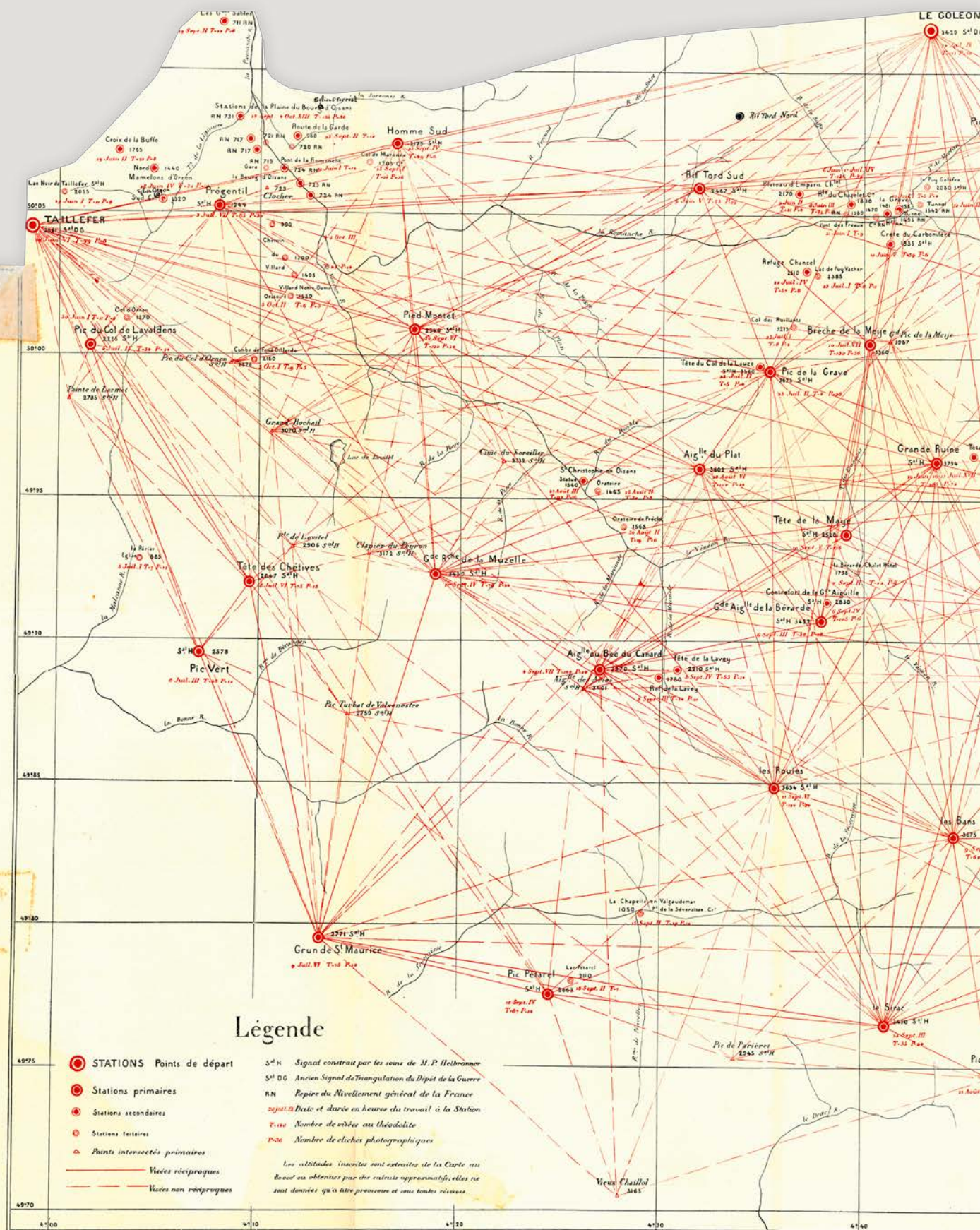
s'inscrivent dans l'histoire des grandes expéditions qui ont construit la géodésie

panoramiques. Pas encore expert, mais apprenti éclairé, il écrit ainsi, en août 1893, une page essentielle de son histoire.

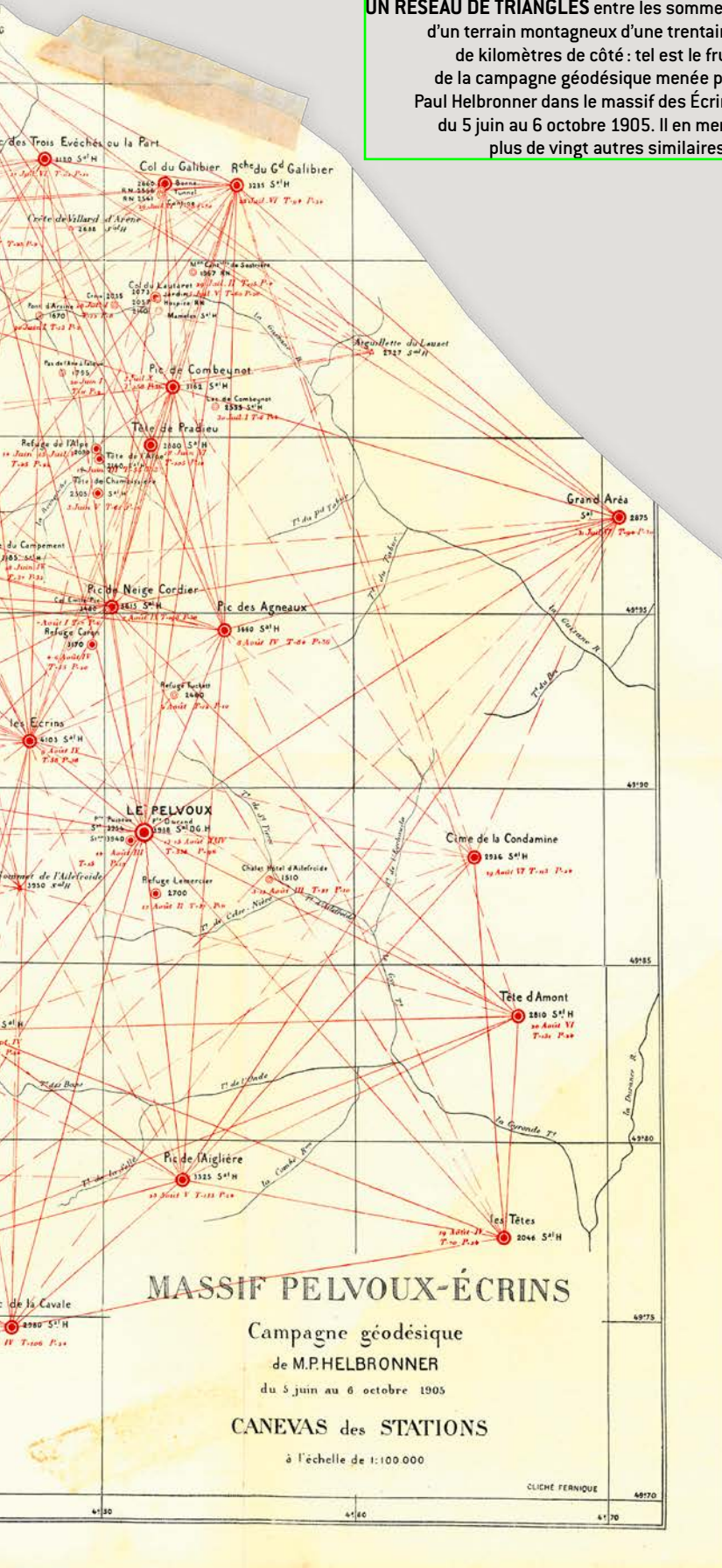
Durant une semaine passée entre l'observatoire Vallot et le sommet du mont Blanc, il découvre les Alpes dans toutes leurs dimensions. Une démesure à sa mesure.

QUELQUES ACCESSOIRES du géodésien lors de ses ascensions : gamelle, couverts, quart, gourde, boîte à œuf, espadrilles de corde, sac de couchage et, bien sûr, son appareil stéréoscopique avec son système de visée, ses optiques et ses plaques de verre.





UN RÉSEAU DE TRIANGLES entre les sommets d'un terrain montagneux d'une trentaine de kilomètres de côté : tel est le fruit de la campagne géodésique menée par Paul Helbronner dans le massif des Écrins du 5 juin au 6 octobre 1905. Il en mena plus de vingt autres similaires...



en 1872 avec Auguste Dupont des forges de Pompey, près de Nancy, fournisseur de l'acier qui servit à la construction de la tour Eiffel, apporte une dot considérable.

Les deux frères d'Hélène, gérants de l'entreprise, associent Paul Helbronner à leur affaire, qui devient même administrateur des forges. Une fonction, il faut bien le dire, plutôt honorifique ! Car, à Nancy, Helbronner s'ennuie. Les Alpes l'obsèdent. Alors il ressort ses tours d'horizon photographiques. Ayant sans doute hérité de sa mère, il entreprend de peindre les montagnes du massif du Mont-Blanc photographiées quelques années plus tôt.

Les panoramas s'étirent tout en longueur, pour que les proportions permettent de profiter du contenu des tours d'horizon à 360 degrés. Les aquarelles ne peuvent donc qu'être immenses. Cela n'effraie pas Helbronner. Pour représenter des secteurs tels ceux pris depuis le col du Géant ou du mont Maudit, les tableaux atteignent déjà un mètre quarante à quelque deux mètres. Mais pour représenter le massif dans son entier et d'un seul tenant, la fresque, car il s'agit bien de cela, dépasse six mètres ! Et il fera de même avec le massif des Écrins... Ces panoramas aquarellés réalisés à partir de 1899 forment assurément le legs le plus spectaculaire laissé par Helbronner, tout en témoignant d'un indéniable talent artistique. Incroyablement réalistes jusque dans les moindres détails, ce « sont autant de planches d'anatomie qui subliment toute l'anatomie des montagnes. »

Tisser une toile d'araignée sur les Alpes

En 1902, Helbronner visite les Écrins, et plus particulièrement le Pelvoux, sommet majestueux à l'origine de son autre fresque aquarellée. Dans le tome V de sa *Description géométrique détaillée des Alpes françaises*, paru en 1931 – mais relatif à ses premières campagnes géodésiques en 1903 et 1904 –, il expliquera combien il était alors habité par son projet : « [...] depuis l'exécution en 1899 de mon tour d'horizon dessiné et peint à l'aquarelle du sommet du mont Blanc, je me détachais de plus en plus de toute occupation étrangère à la définition mathématique et détaillée des Alpes françaises à laquelle je voulais consacrer toute mon activité, mon attention était attirée tout à coup sur une proposition faite à la direction centrale du Club alpin français par Henri

Une méthode exigeante adaptée au terrain

D'une rare obstination, Paul Helbronner a mis en place un procédé qui ne variera pas en vingt-cinq ans, fondé sur une systématisation des différentes opérations.

Une procédure aux règles strictes tant il évoluait presque toujours en terrain hostile.

Le travail d'Helbronner reposait sur la géodésie : il devait établir les coordonnées en plan et en altitude d'un réseau de repères essentiellement constitué de sommets, et donc mesurer les montagnes des Alpes françaises selon la méthode de la triangulation. En reliant ainsi ces points entre eux, s'appuyant sur une ossature nord-sud allant du Léman à la Méditerranée, il constituait un canevas en vue d'une carte qui restituerait les reliefs. C'est un point essentiel car, à l'époque, l'échelle de la carte d'état-major - 1/80 000 - ne permettait pas une représentation des reliefs très marqués en montagne.

Avant la saison estivale, il choisissait pour chaque

massif ses repères - ou stations, principales et secondaires -, des points hauts sur lesquels il faisait monter des signaux par des locaux. Généralement constitués de grands amas de pierres empilées trouvées sur place, plus rarement en bois, ils devaient se voir de loin pour faciliter visées et mesures. Accompagné de guides et de porteurs, Helbronner emportait un matériel conséquent, dont des tentes et tout le nécessaire pour bivouaquer, cuisiner et grimper, ainsi que des appareils photographiques et de mesure. Ces derniers comprenaient un théodolite et un étrange outil de son invention, une grande lunette qu'il appelait « cercle azimutal à deux

microscopes ». Helbronner enchaînait les ascensions avec cet équipement lourd et volumineux, quelles que soient les conditions météorologiques et la difficulté technique, signe d'une résistance hors norme.

Au sommet, souvent atteint à l'aube après une longue marche nocturne, le travail débutait. Il sortait d'abord son théodolite pour une première série de triangulations et relevait les données sans attendre. Puis, plus tard en matinée, quand la lumière devenait favorable, il effectuait un de ses fameux tours d'horizon photographiques. Pour recouper ses informations et ainsi gagner en précision, ou à cause d'un mauvais temps le matin, il recommençait souvent l'après-midi. Tout compris, les journées de plus de quinze heures étaient fréquentes. Et le rituel se répéta trois à quatre fois par an durant un quart de siècle...

- D. L.



Sous un signal visible de loin (ici en bois), les alpinistes, mesures accomplies, se reposent près d'un théodolite (instrument mesurant des angles dans les plans horizontal et vertical afin de déterminer une direction) et d'un parasol visant à éviter les reflets.

Vallot. » Le 4 novembre 1902, Vallot vient en effet d'obtenir la fondation d'une caisse d'action du Club alpin français. Helbronner s'empresse d'y adhérer, tout en suggérant que le club crée une commission de topographie. À l'aide d'un exposé circonstancié, il s'arrête longuement sur la nécessité de cartographier les Alpes à l'échelle 1/50 000.

Le bureau de la commission est formé le 2 février 1903, avec Vallot comme secrétaire. Ainsi exaucé, bénéficiant de moyens illimités, Paul Helbronner entame cette même année une série de campagnes dans les massifs alpins qui s'achèvera en 1928 et le mènera jusqu'en Corse. En théorie, l'objectif paraît simple : du nord au sud, selon une méridienne allant du Léman à la Méditerranée, tisser un réseau géodésique, une toile d'araignée au-dessus des Alpes qui servira de canevas pour établir une carte définitive, d'une précision jamais atteinte, car son échelle permettra de restituer les reliefs de la haute montagne.

En pratique, l'entreprise se révèle titanique. Chaque année durant un quart de siècle, Helbronner passe trois à quatre mois consécutifs en montagne, par tous les temps et dans des conditions précaires, sur un terrain souvent retors. Il franchit et gravit des centaines de cols et de brèches, d'éminences et de cimes, y compris difficiles. Lors de véritables expéditions, avec le soutien de porteurs et de guides, il installe des centaines de repères grâce auxquels il photographie et mesure, inlassablement. Dans les années 1950, l'alpiniste Lionel Terray qualifiera les membres de sa profession de *conquêteurs de l'inutile*. Helbronner, lui, se veut le métronome de l'utile.

Une quête inutile ?

Une fois la saison achevée, il doit encore corriger ses calculs et procéder aux fastidieuses compensations de son réseau géodésique, seules garantes d'une précision optimale. Le concours de Vallot, qui lui apprend plus que les rudiments dans le domaine, est déterminant dans les premières années. Même la Première Guerre mondiale ne l'écarte qu'un temps de son dessein - en 1915 et 1916 -, qu'il parachève avec la publication à partir de 1910 de sa monumentale *Description géométrique détaillée des Alpes françaises* en douze tomes. L'œuvre d'une vie, car Helbronner ne verra pas la sortie du dernier volume, paru en 1939. Il s'est éteint le 18 octobre 1938.

En menant ainsi ses travaux en stakhanoviste aveugle, mû par une ambition et un orgueil sans bornes, ainsi que par une quête pathétique de reconnaissance, Helbronner a fini par oublier le temps qui passe. Certes, il a étoffé son bagage en devenant docteur ès sciences mathématiques en 1912, en obtenant la Légion d'honneur en 1925 avant d'entrer à l'Académie des sciences en 1927. Plusieurs présidents de la République et souverains européens l'ont personnellement félicité ; il a partagé sa passion de la montagne avec le roi Albert I^{er} de Belgique, a été reçu par le pape Pie XI au Vatican, et même par Mussolini...

Mais trente-cinq ans séparent sa première campagne de mesures dans les Alpes en 1903 et la rédaction du tome XII de sa *Description*. Une période durant laquelle les progrès ne l'ont pas attendu. Les méthodes et instruments de mesure toujours plus puissants ont réduit les distances, tout comme les téléobjectifs ont « rapproché » les montagnes sans qu'il soit nécessaire de les gravir systématiquement. Et c'est d'ailleurs la photographie, en plein essor

dans sa version aérienne durant l'entre-deux-guerres, car elle restitue le terrain en relief, qui va rendre son travail obsolète.

Alors, Helbronner n'est-il qu'un métronome de l'inutile ? Que retenir de son entreprise ? On ne mettra pas ici en cause la qualité de ses mesures, qui se sont révélées d'une grande justesse. Mais sa belle carte des Alpes n'a jamais vu le jour, et seule l'armée a utilisé une partie de ses données. Cherchons donc son héritage ailleurs. Souvenons-nous d'abord de ces incomparables panoramas aquarellés, œuvres d'art uniques. Plus encore, penchons-nous sur son exceptionnelle collection photographique – quelque 12 000 tirages et plus de 13 000 plaques de verre – conservée au Musée dauphinois à Grenoble : une ressource documentaire de tout premier ordre, l'une des plus étendues sur les Alpes françaises, et sans doute un trésor pour étudier l'évolution des régions montagnardes alors que le changement climatique habite tous les esprits. Paul Helbronner n'a pas révolutionné la science. Partant d'une quête sisyphéenne, il a juste écrit une grande aventure humaine. ■

■ À ÉCOUTER

Le jeudi 28 avril 2016, de 16 h à 17 h, Daniel Léon reviendra sur la vie de Paul Helbronner dans la partie *Actualités* de l'émission **La marche des sciences**, sur France Culture.
www.franceculture.com

■ BIBLIOGRAPHIE

M. Coûteaux, *La face cachée d'Helbronner, L'Alpe n° 7*, Glénat/Musée dauphinois, 2000.

P. Helbronner, *Description géométrique détaillée des Alpes françaises*, tomes I à XII, Gauthier-Villars, 1910-1938.

P. Helbronner, *Une semaine au Mont Blanc – Août 1893*, G. Steinhil, 1894.



LES { Partagez les savoirs }

RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

Entrée gratuite

Au Jardin des Plantes

Détails sur mnhn.fr, rubrique : 'les rendez-vous du Muséum'

POUR LA SCIENCE

FILMS

Cycle Pousse-Pousse : nouveau cycle pour enfants (dès 2 ans)

Samedi 21 mai - 16h : Le château de sable

Dimanche 22 mai - 16h : Sametka, la chenille qui danse

RENCONTRE SONORE

Lundi 23 mai - 18h : Les cigales de France

Avec J. Sueur, entomologiste et bioacousticien, Muséum, S. Puissant, écologue, Muséum de Dijon et F. Deroussen, audio-naturaliste professionnel, label naturophonia

MÉTIER DU MUSÉUM

Dimanche 29 mai - 15h : Mycologue, spécialiste des moisissures, J. Dupon

UN CHERCHEUR / UN LIVRE

Lundi 30 mai - 18h : Descendons-nous de Darwin ?

Édition le Pommier, 128 p., avec G. Lecointre, zoologiste et systématique, Muséum

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

BAR DES SCIENCES

Dimanche 22 mai - 17h30 : L'aérodynamique naturelle, comment la nature inspire l'Homme ?

Animé par M.-O. Monchicourt, journaliste. Avec A. Abourachid, spécialiste de la locomotion des animaux, Muséum, G. Boeuf, conseiller biodiversité et climat, Ministère en charge de l'écologie, B. Thiria et R. Godoy-Diana, spécialistes de la physique et de la mécanique des fluides, École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris

Café-restaurant la Baleine - 47 rue Cuvier, Paris 5^e



LOGIQUE & CALCUL

Au pays des illuminés du nombre π

Le plus intéressant des nombres est sans conteste π .

La suite de ses décimales constitue un terrain de recherches et de jeux, ouvert à tous pour le meilleur... et pour le pire !

Jean-Paul DELAHAYE

Le nombre π a beaucoup d'amis. Il serait parfois souhaitable qu'il en ait moins, car la passion pour le nombre d'Archimède suscite d'étranges et invraisemblables histoires. Plus que n'importe quel nombre, π intéresse : on travaille et on s'amuse avec lui, et parfois... on délire.

Certains lui préfèrent le « nombre d'or » ϕ , égal à $(1 + \sqrt{5})/2$. Dans les librairies pour le grand public, on trouve plus de publications consacrées à ϕ que dédiées à π , mais c'est sans doute parce que ϕ est plus élémentaire et qu'il est associé à certaines croyances numérologiques. On trouve d'ailleurs aussi plus de livres d'ésotérisme que de science dans les rayons de ces mêmes librairies : certains de ces magasins vendent du matériel de haute technologie (appareils photo, télévisions, téléphones, ordinateurs, etc.) qui naît des progrès de la science et, étrangement, orientent leurs clients vers la littérature spiritualiste, occultiste ou superstitieuse...

Pour les scientifiques, cependant, il n'y a aucun doute : π est le roi des nombres, celui qui réunit le plus de mystères et d'étrangetés, celui qui a la plus grande importance mathématique. Il incite aux rêves et parfois engendre la folie, comme celle d'en calculer de nombreuses décimales : aujourd'hui, on connaît 13 300 milliards de chiffres de π . Si on les imprimait, cela donnerait l'équivalent de 10 millions d'ouvrages assez gros. Aucun œil humain n'a bien sûr parcouru ces

chiffres calculés, qui n'existent que dans la mémoire des ordinateurs !

On remarquera que ϕ n'est pas connu de tout le monde, alors que π , lui, s'apprend à l'école primaire et ne s'oublie jamais. Le nombre ϕ est algébrique : il est une solution de l'équation simple $x^2 = x + 1$, alors que π est « transcendant ». Ce résultat démontré il y a plus d'un siècle par Ferdinand von Lindemann signifie que π n'est la solution d'aucune équation polynomiale à coefficients entiers (comme celle citée pour ϕ).

Calculer ϕ revient à calculer la racine carrée de 5, ce qui, par tâtonnements, est facile, alors qu'aucune méthode aussi naturelle, rapide et simple n'est disponible pour π . Le nombre ϕ est le préféré des snobs et des naïfs qui pensent qu'il donne le secret de la beauté, alors que c'est plus que douteux (voir le livre de Marguerite Neveux dans la bibliographie). Au contraire, le nombre π s'impose, qu'on ait envie de le connaître ou pas. Il est dans votre poche, où le diamètre et la circonférence des pièces de monnaie sont liés par π . Il est dans le volume de la Terre et sa surface, que l'on calcule à partir de son rayon et de π . Il est dans la longueur du trajet parcouru par votre voiture, égale à π fois le nombre de tours fait par une roue multiplié par son diamètre. Il est dans les lois de probabilités. Il est partout en physique et bien d'autres sciences.

Du fait de son importance incontestable, certains veulent s'approprier π et en apprennent par cœur les décimales. Ce sport

un peu fou est maintenant coordonné par un site internet qui, après avoir fixé clairement les règles du jeu, maintient à jour une liste « officielle » des records successifs (<http://pi-world-ranking-list.com/index.php?page=home>).

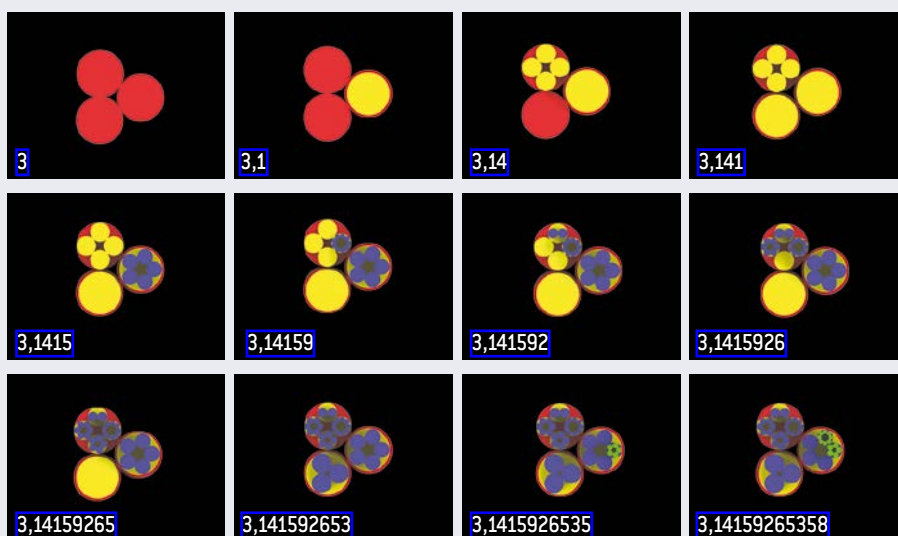
Les règles indiquent qu'on ne compte que les chiffres décimaux après la virgule. Aucune erreur n'est autorisée lors de l'énumération de ces décimales, qui doit s'effectuer dans l'ordre et en public. Deux témoins non liés au « récitant » doivent certifier l'exploit. Lorsque le nombre de décimales dépasse 10 000, un troisième témoin officiel (notaire, huissier, etc.) doit assister à la performance, puis remplir et signer un formulaire.

Le record : plus de 70 000 décimales récitées

Aujourd'hui, le record officiel est détenu par l'Indien Suresh Kumar Sharma qui, le 21 octobre 2015, a récité 70 030 décimales de π en 17 heures et 14 minutes. Il a ainsi battu de peu le record précédent de l'étudiant indien de 21 ans Rajveer Meena, qui avait récité, les yeux bandés pour mieux se concentrer, 70 000 décimales de π . La performance s'était déroulée le 21 mars 2015 et avait duré 9 heures et 27 minutes, ce qui correspond à 2 chiffres par seconde, bien plus vite que le détenteur actuel du record. Ce record a été validé par le très exigeant livre *Guinness des records*.

Une figuration de π

Francesco De Comité, du laboratoire CRISTAL de l'université de Lille 1, a conçu et réalisé une sculpture virtuelle originale de π . Pour la construire, on part d'un disque. Le premier chiffre de π est un 3, aussi place-t-on à l'intérieur trois disques de même rayon occupant le plus de place possible dans le premier disque. Cela détermine trois nouveaux disques où l'on inscrira, selon le même principe, les trois d cimailes suivantes : 1, 4 et 1. Pour les 1, on place un disque concentrique un peu plus petit que le disque d'accueil ; pour les 0, on place dix disques. Les disques ainsi crées (pris dans l'ordre de leur création) permettent d'inscrire de nouvelles d cimailes, cela jusqu'à l'infini (  mesure qu'on utilise certains disques en les remplissant, d'autres sont crées). En utilisant des cylindres de plus en plus hauts dont les bases sont les disques ainsi obtenus, on rend visibles ces disques et on obtient une sculpture des d cimailes de π . Dans le schéma explicatif ci-contre, on a utilisé la couleur rouge pour les trois premiers disques. On remplit ces disques par des disques jaunes. Quand il n'y a plus de disques rouges disponibles, on remplit les disques jaunes par des disques violets. Quand les disques jaunes sont épuisés, on remplit les disques violets par des disques verts, etc.



Sudokus avec π

La date du 14 mars, que l'on écrit souvent « 3-14 » dans le monde anglo-saxon, a été déclarée journée de π . Diverses manifestations s'y déroulent, en particulier à l'université de Marseille depuis trois ans.

À l'occasion de cette journée, l'éditeur de jeux et casse-tête Brainfreeze Puzzles a créé des sudokus originaux et intéressants, disponibles pour tous et qui ont été soumis aux élèves de nombreuses classes dans le monde.

En voici deux. Attention, les règles liées à π ne sont pas les règles habituelles. Dans le sudoku de gauche, il faut que chaque ligne, chaque colonne et chaque zone dessinée contienne les 12 premiers chiffres de π , qui sont 3 1 4

1 5 9 2 6 5 3 5 8. Il y aura donc deux fois le 1, une fois le 2, deux fois le 3, une fois le 4, trois fois le 5, une fois le 6, pas de 7, une fois le 8, une fois le 9.

Pour le sudoku de droite, chaque ligne, chaque colonne et chaque zone dessinée doit contenir chacun des chiffres 1, 2, ..., 9 une fois exactement et le symbole π trois fois.

3			1	5	4			1		9	5
	1			3					1	3	6
		4			3		8			2	
5			1			9	2	5			1
	9			5			5				
5	8	1			9			3		6	
	5		8			2			5	5	3
				5			6			1	
2			5	1	5			5			9
	6			4		1			3		
1	5	1					5			5	
5	5		4			3	1	6			8

4	9	7	π	5							
	π		8			9	6	1	5	2	
	8			1				π	7		
								π	4		
5	3	9	6								
9	4		π	π	π	7					
					6	2	5	π		7	4
								π	π	3	8
	7	8	4	6	9						
		3		π			4	7	1	6	9
		4		1				6		π	
								4		5	

vérité absolue. Lorsque je pense à π , je vis en harmonie avec cette vérité. »

Le système mnémotechnique d'Akira Haraguchi consiste à associer un chiffre à chaque son utilisé par la langue japonaise. Mémoriser π revient alors pour lui à apprendre des histoires qu'il crée en suivant les décimales de π . Ce sont elles qu'il retient mot à mot et qu'il traduit en liste de chiffres au moment de ses récitations quotidiennes. Il précise : « J'ai créé environ 800 histoires, principalement au sujet d'animaux et de plantes. Pour les 100 premiers chiffres de π , j'ai fabriqué une histoire dont voici le début : "Bien, moi cet être fragile qui a quitté sa maison pour trouver la paix de l'esprit, je vais mourir dans un coin noir ; c'est facile de mourir, mais je reste optimiste..." »

Réciter 200 000 décimales ?

Même si des critères sévères de validation empêchent la reconnaissance des records de Akira Haraguchi jusqu'à 100 000, il ne semble plus faire de doute que mémoriser 100 000 décimales de π est possible à un être humain décidé. Pourra-t-on aller plus loin et, par exemple, atteindre 200 000 ? Cela semble douteux, mais qui sait ? Lorsque le nombre de 50 000 fut atteint, de nombreux spécialistes jugeaient impossible de doubler le record.

Par imagerie cérébrale, le neurobiologiste Amir Raz, alors à l'université Columbia aux États-Unis, et ses collègues ont observé le cerveau d'un sujet apprenant et récitant des décimales de π . Le sujet de leur étude, un étudiant de 22 ans, utilisait le procédé mnémotechnique antique des *loci* pour mémoriser les chiffres. Il consiste à imaginer qu'on parcourt un édifice réel dont on a associé les différentes pièces ou éléments de décor aux choses que l'on doit fixer dans sa mémoire.

Outre des précisions sur les parties du cerveau sollicitées par ce type d'exercice, l'une des conclusions de l'article des neurobiologistes est que les exploits de ce genre tiennent bien plus à un entraînement prolongé et la maîtrise de bonnes

Un peu avant encore, le record était détenu par un Chinois, Chao Lu, qui avait récité 67 890 décimales en un peu plus de 24 heures [moins d'un chiffre par seconde]. Dans un entretien, il précisait que le travail de mémorisation lui avait demandé une année. Il expliquait aussi qu'il connaissait 100 000 décimales de π , mais que lors de l'épreuve, il avait malencontreusement dit « 5 » pour le 67 891^e chiffre, alors qu'il aurait dû dire « 0 ». C'était sa seule erreur, mais elle a rendu impossible la validation des 100 000 décimales.

Quelques années auparavant, en 2006, le Japonais Akira Haraguchi, alors âgé de 59 ans, avait lui aussi récité 100 000 décimales de π . Malheureusement, les informations sur son exploit n'ont pas été jugées assez précises et sûres pour que son record soit reconnu.

Lors d'un entretien donné à un journaliste du *Guardian* en mars 2015, il affirmait : « Mon

affection et mon respect pour π n'ont jamais cessé depuis 2006. En 2010, j'ai posté une vidéo dans laquelle je récite 101 031 décimales de π . Depuis, j'ai encore progressé et je peux en réciter 111 700. Chaque jour depuis 2006, je récite 15 000 décimales, ce qui me demande environ une heure. Pour moi, réciter π , c'est comme chanter un mantra bouddhiste et méditer. J'essaie en ce moment d'aller plus loin et de réciter 25 000 chiffres chaque jour, ce qui m'occupe environ trois heures. »

Des histoires « chiffrées »

Akira Haraguchi a expliqué la philosophie qui l'encourage à poursuivre ses efforts : « Toutes les choses de ce monde, nous-mêmes inclus, sont des agrégats d'atomes, qui sont faits d'électrons qui tournent. La Terre tourne, la Galaxie aussi, l'Univers aussi. Autrement dit, je crois que la rotation est la

méthodes mnémotechniques qu'à la possession d'un don particulier.

L'histoire la plus extraordinaire à propos de la mémorisation des décimales de π est incontestablement celle d'Andriy Slyusarchuk, un étonnant personnage né en Ukraine en 1971 et surnommé par la presse de son pays Docteur Pi. Il se présentait comme diplômé en médecine, psychiatre, neurochirurgien, psychothérapeute, joueur d'échecs de haut niveau et capable d'exploits de calcul mental et de mémorisation hors du commun. Son talent, qu'on peut comparer à celui du Français Christophe Rocancourt surnommé « l'escroc des stars », le conduisit à être accueilli par diverses universités et institutions de recherche, à recevoir des prix pour ses travaux scientifiques et ses actions, à exercer comme chirurgien, à être invité de nombreuses fois à la télévision, et à vendre très chers des médicaments à des malades en fin de vie. Il occupa même des fonctions dans un ministère et reçut le soutien de deux présidents ukrainiens, Viktor Iouchtchenko et Viktor Ianoukovitch.

Docteur Pi, l'escroc aux 300 millions de décimales

Concernant π , à l'occasion de démonstrations en public, il réussit à convaincre un certain nombre d'observateurs qu'il en connaissait 30 millions de décimales. Il prétendit même plus tard en connaître 300 millions. Bien sûr, il ne les récitait pas, mais en indiquait des tranches en réponse à des questions qu'on lui posait. Notons qu'à raison d'une décimale par seconde sans jamais s'arrêter, il faudrait 9,5 ans pour énumérer les 300 millions de décimales prétendument connues par le Docteur Pi. C'est impossible : pour apprendre ces mêmes décimales en y consacrant tout son temps nuit et jour, à raison d'une décimale apprise par seconde, il faut là encore 9,5 ans de travail. Comment a-t-on pu le croire ?

Ses records n'ont pas été validés et, bien que n'ayant jamais été pris en flagrant délit de tricherie, certains soupçonnaient qu'un complice, à l'aide d'un appareil caché dans son oreille, lui soufflait les réponses.

Après des années de succès divers durant lesquelles il s'enrichit, en particulier grâce à de prétendus remèdes miraculeux mis au point par ses soins, les choses se mirent à mal tourner. On découvrit qu'il n'avait pas les diplômes qu'il prétendait posséder. Plus tard, un informaticien avoua à la presse qu'il avait créé des programmes pour aider Andriy Slyusarchuk dans ses exploits concernant π et qu'il l'avait aussi assisté pour composer des articles scientifiques en plagiant des articles déjà publiés. Les enquêtes déclenchées alors aboutirent le 14 février 2014 à sa condamnation à huit ans de prison pour une série de faits, certains graves : faux et usages de faux, pratique illégale de la médecine, meurtre par négligence (certaines de ses interventions chirurgicales furent catastrophiques), etc. Aux dernières nouvelles, il a tenté de se suicider en prison.

Le nombre π peut se calculer de mille façons différentes par des formules de toutes

sortes : limites de suites particulières (qui par exemple convergent vers la longueur du périmètre d'un cercle de diamètre 1 – c'est l'idée de la méthode d'Archimède), intégrales (donnant l'aire d'un disque de rayon 1), séries infinies, produits infinis, etc. Nous présenterons dans l'article du mois prochain une variété de méthodes nouvelles ou inattendues de calcul de π .

Ces formules et méthodes conduisent toutes au même nombre exactement, et cette affirmation résulte dans chaque cas particulier d'une démonstration mathématique incontestable. Le nombre π est une sorte d'attracteur mathématique qui aspire des nombres provenant d'origines diverses et qui, au travers de formules différentes, s'accordent comme par miracle.

Si les démonstrations mathématiques indiquant qu'on tombe bien sur un seul et même nombre ne vous satisfont pas, vous pouvez contrôler l'accord des formules à l'aide de calculs par ordinateur. En tirant

Un grand π sur le sable de Royan

Le 14 mars 2015, un hommage à π a été rendu sur la plage du Chay, à Royan, avec la participation de l'artiste Jehan-Benjamin (« J.ben »), spécialiste de dessin à grande échelle sur le sable (www.jbenart.com/fr/), et des élèves du collège Henri-Dunant de Royan. Un grand symbole π a été dessiné sur la plage ; il a ensuite été encerclé par les élèves qui tenaient chacun dans les mains une décimale du fameux nombre.



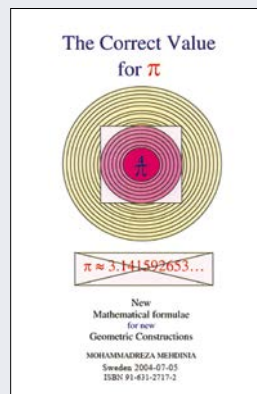
π simplifié ?

Les simplificateurs de π désapprouvent le consensus des mathématiciens sur la valeur de la constante π . Cette discordance diminue leur crédibilité. Dans l'article est mentionné André Aigoïn, qui rejette absolument le π des mathématiciens (qu'il dénomme le « π officiel »). Pour lui, π vaut $^4\sqrt{(2143/22)} = 3,14159265258264612521...$

Cette valeur n'est pas

compatible avec celle publiée par l'Indien Sarva Jagannadha Reddy qui, dans de nombreux articles et deux livres, soutient que l'authentique valeur de π est le nombre : $(14 - \sqrt{2})/4 = 3,1464466094...$

Aucune de ces deux valeurs n'est conforme avec celle proposée par Mohammadreza Mehdi-
nia, qui vit en Suède et a publié (en plusieurs



langues) l'ouvrage *The Correct Value for π* (qu'on trouve gratuitement sur le

site <http://correctpi.com/>, dans lequel il défend que la bonne valeur de π est tout simplement $3,125 = 25/8$.

Pendant un temps,

500 000 couronnes suédoises étaient offertes à qui trouverait une erreur dans le livre de Mehdi-nia, mais depuis peu l'offre a été retirée. Quelqu'un aurait-il gagné ? D'autres valeurs de π avaient déjà été proposées plus tôt dans l'histoire, dont l'une, la valeur 3,2, avait failli être imposée par une loi de l'État d'Indiana, aux États-Unis.

Les mathématiciens « officiels » ont au moins un avantage sur leurs contradicteurs : ils sont d'accord entre eux !

passant rapidement sur les deux premiers largement connus aujourd'hui.

Dans la Bible, on trouve l'affirmation indirecte que $\pi = 3$ (<https://www.uwgb.edu/dutchs/pseudosc/pibible.htm>). C'est une belle simplification, mais il ne s'agit pas d'un texte mathématique et il n'est pas certain que le passage qu'on interprète de cette façon signifiait vraiment pour ses auteurs que $\pi = 3$.

Un formidable simplificateur de π fut l'Américain Edward Johnson Goodwin, qui réussit presque à faire adopter une loi pour imposer ses « découvertes ». En 1897, il mena une série de raisonnements et de calculs dont l'un donnait $\pi = 3,2 = 16/5$. Il proposa à l'État d'Indiana d'en faire une constante officielle pour simplifier la vie de tous. L'intention était louable. Heureusement, il échoua (http://en.wikipedia.org/wiki/Indiana_Pi_Bill).

Une formule (trop) simple du Midi

Après la parution de mon livre sur π en 1997, j'ai reçu, étalées sur une période d'un an, une dizaine de lettres d'André Aigoïn, un amateur de mathématiques du midi de la France qui proposait ceci :

$$\pi = ^4\sqrt{(2143/22)} = 3,14159265258...$$

L'approximation est intéressante et peut certainement servir à des usages pratiques, mais le nombre proposé n'est pas π et les arguments de mon correspondant ne convaincront aucun mathématicien.

Je tentais en vain de le ramener à la raison : son expression faisait de π un nombre algébrique, ce qui contredit le résultat de von Lindemann. La conviction de ce correspondant était très forte et le conduisait dans ses lettres à exprimer de l'hostilité à l'égard de l'autre π (celui de tout le monde), qu'il appelait avec insistance et hargne le « π officiel » ou même l'« usurpateur ». Ce simplificateur de π , à ma connaissance, ne parvint jamais à publier ses élucubrations, qui sont donc restées dans ses dossiers et les miens.

Les temps ont changé et, grâce à Internet et à la multiplication récente de pseudo-journaux scientifiques, toute idée, aussi farfelue soit-elle, peut aujourd'hui trouver

de chacune des définitions une procédure de calcul et un programme, vous obtiendrez des décimales correspondant aux différentes formules donnant π . Vous comparerez les résultats et découvrirez expérimentalement l'unicité du nombre calculé. Aujourd'hui, personne ne peut donc douter que $\pi = 3,14159265358979323846264338327950288419716939937510...$ (pour d'autres décimales, voir par exemple http://www.gecif.net/articles/mathematiques/pi/pi_decimales.html).

Les obstinés simplificateurs de π

Cependant, π reste compliqué, et l'être humain cherche à simplifier tout ce qui peut l'être et rêve de formules élémentaires. Poussé à l'extrême, ce désir conduit à une forme de folie. Pour se débarrasser du mystère de π et de la gêne ressentie face à la complexité des mathématiques qui lui

sont attachées, certains se persuadent que π est bien plus simple que tout ce qu'on a cru jusqu'à maintenant.

Cette volonté simplificatrice s'est longtemps exprimée sous forme géométrique. C'était l'époque des « quadratureurs du cercle ». Avec une règle (non graduée) et un compas, on tentait de construire un carré de même aire qu'un cercle donné. La nature transcendante de π a pour conséquence que c'est impossible : toute prétendue solution au problème de la quadrature du cercle est nécessairement fautive. Aujourd'hui encore, certains passionnés de géométrie s'attaquent en vain au problème de la quadrature, mais ils sont déconsidérés et plus personne ne leur prête attention.

Il existe cependant une forme nouvelle et algébrique du désir de ne plus subir la complexité intrinsèque de π . Je vais mentionner plusieurs cas remarquables des effets de cette volonté simplificatrice en

sa place sur la Toile et même comme article dans une revue prétendument scientifique. Toute folie est en mesure de se déclarer « validée par la communauté académique », ce qui trompera les journalistes peu attentifs et les amateurs mal informés.

J'ai pris conscience de cette nouvelle situation en recevant, il y a quelques mois, un livre (en version pdf) que m'a fait parvenir son auteur. Jamais un simplificateur de π n'avait aussi bien réussi que ce Sarva Jagannadha Reddy, qui se présente comme un *retired zoology lecturer* habitant à Tirupati en Inde. Son livre, écrit en anglais, est intitulé *The Gayatri Pi value*.

Des revues prédatrices qui publient n'importe quoi, si l'on paye

Que l'on puisse publier n'importe quoi n'est pas une nouveauté ; lui-même avait auparavant publié un ouvrage donnant sa version simplifiée de π , et bien d'autres farfelus ont publié à compte d'auteur des solutions du problème de la quadrature du cercle. Ce qui m'a étonné est que le livre reçu est composé de la reproduction de quinze articles dont la plupart avaient auparavant été publiés dans des revues scientifiques d'apparence académique. Voici quelques-uns des titres de ces revues : *International Journal of Mathematics and Statistics Invention*, *International Journal of Engineering Inventions*, *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology*. On peut rechercher sur Internet les sites de ces revues et contrôler qu'effectivement les articles reproduits dans le livre y ont bien été publiés.

Je ne connaissais aucune de ces revues et, sans avoir mené une enquête détaillée, je pense qu'elles appartiennent toutes à la catégorie des nombreuses récentes revues où l'auteur paye pour être publié et où le contrôle scientifique par une expertise demandée à des personnalités compétentes est léger, simulé ou totalement inexistant. Ces fausses revues, parfois qualifiées de prédatrices, sont une plaie pour la communauté scientifique. Comme le montre l'exemple de Sarva Jagannadha Reddy, on peut y publier

les plus grosses âneries en contradiction totale avec l'état des connaissances sans être soumis à aucun contrôle véritable ; il suffit de payer. Une liste des éditeurs de ces revues faussement scientifiques est maintenue à jour en ligne : <https://scholarlyoa.com/individual-journals/>

Les articles reproduits dans le livre de Sarva Jagannadha Reddy proposent tous des arguments conduisant à

$\pi = (14 - \sqrt{2})/4 = 3,1464466094...$, ce qui est nettement moins bon que l'approximation de mon correspondant français. La formule fait à nouveau de π un nombre algébrique... ce qui, si les preuves données étaient correctes, constituerait une révolution mathématique sans précédent, puisqu'on aurait une contradiction au cœur même de la théorie des nombres !

Pour l'auteur, la valeur de π admise par le reste du monde provient d'erreurs de raisonnement qu'il analyse. Ce faisant, il montre qu'il n'a rien compris et n'a même pas atteint le niveau de compréhension en matière de théorie des nombres qu'avait Archimède il y a 2 000 ans, niveau qui depuis est devenu plus précis encore, quand le concept de nombre réel a été mieux maîtrisé. Je ne discuterai pas ici des erreurs de Sarva Jagannadha Reddy, d'autres l'ont fait. Ses articles sont des non-sens absolus.

Simplifier π est un rêve, et c'était sous une forme géométrique celui de tous les quadratureurs du cercle. Le fait que le nombre π soit transcendant signifie qu'il ne pourra jamais se simplifier beaucoup et que les amateurs qui veulent s'affranchir de la réalité du monde délicat des mathématiques perdent leur temps. Le nombre π a beaucoup d'amis, et c'est parfois un grand malheur.

Et il est affligeant que se soit développée une littérature d'apparence scientifique, prête à publier n'importe quel article pourvu qu'on paye. Elle nuit au bon fonctionnement de la science. Cette littérature donne l'illusion à certains de mener un travail contrôlé et reconnu, ce qui n'est pas vrai. Cela rend plus difficile à l'amateur sincère et curieux de faire le tri entre la science et le simulacre de la science.

L'AUTEUR



J.-P. DELAHAYE est professeur émérite à l'université de Lille et chercheur

au Centre de recherche en informatique, signal et automatique de Lille (CRISTAL).

BIBLIOGRAPHIE

Wikipedia, Andriy Slyusarchuk, consulté en février 2016.

J.-P. Delahaye, *Les simplificateurs de π* (<http://www.scilog.fr/complexites/les-simplificateurs-de-pi/>), 2015.

A. Raz et al., *A slice of π : An exploratory neuroimaging study of digit encoding and retrieval in a superior memorist*, *Neurocase*, vol. 15(5), pp. 361-372, 2009.

J.-P. Delahaye, *Le Fascinant Nombre π* , Belin/Pour la Science, 1997.

M. Neveux, *Le Nombre d'or, radiographie d'un mythe*, Seuil, 1995.



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

SCIENCE & FICTION

L'imaginaire cristallisé

Scintillants, géants ou sources de pouvoirs magiques, les cristaux sont omniprésents dans l'univers de la science-fiction et du fantastique. Pourquoi nous fascinent-ils ainsi ?

Jean-Sébastien STEYER et Roland LEHOUCQ

Illustration : Marc BOULAY

Stendhal utilisait le terme de cristallisation pour parler d'amour, George Sand voyageait à travers des paysages grandioses en observant des géodes à la loupe. Ils ne sont pas les seuls écrivains, artistes ou cinéastes à avoir exprimé une fascination pour les cristaux et les avoir intégrés dans leur univers. L'intérêt pour les cristaux, tels ceux qui forment la neige, le sel ou le sucre, est ancien. Le terme « krystallos » a été créé dès l'Antiquité par le géographe grec Strabon pour désigner la glace, puis, par extension, le quartz et, enfin, le cristal de façon générale. Quelle est l'origine de cette fascination pour les cristaux ?

L'attraction envers les cristaux est peut-être due à leur façon de jouer avec la lumière. Leurs propriétés optiques (réflexion, réfraction, etc.) n'ont pourtant rien de magique. Elles sont dues à l'agencement régulier et périodique de leurs constituants. Cette structure périodique a inspiré Benoît Peeters et François Schuiten dans la bande dessinée *La Fièvre d'Urbicande* (1985). Ils imaginent une sorte de cube vide qui se multiplie et dont les arêtes croissent indéfiniment, ce qui sème le désordre à travers la cité. Cet étrange cristal évoque tantôt la pyrite (sulfure de fer) par son réseau cubique, tantôt la stibine (sulfure d'antimoine) par sa section polygonale.

Dans le film *Chronicle* (Josh Trank, 2012), trois adolescents viennent accidentellement en contact avec des cristaux qui leur donnent des superpouvoirs. Les jeunes trouvent les



DANS LE FILM DARK CRYSTAL (1982), le monde puise son énergie dans un cristal gigantesque. Mais lorsque ce dernier est brisé, l'équilibre du monde est rompu.

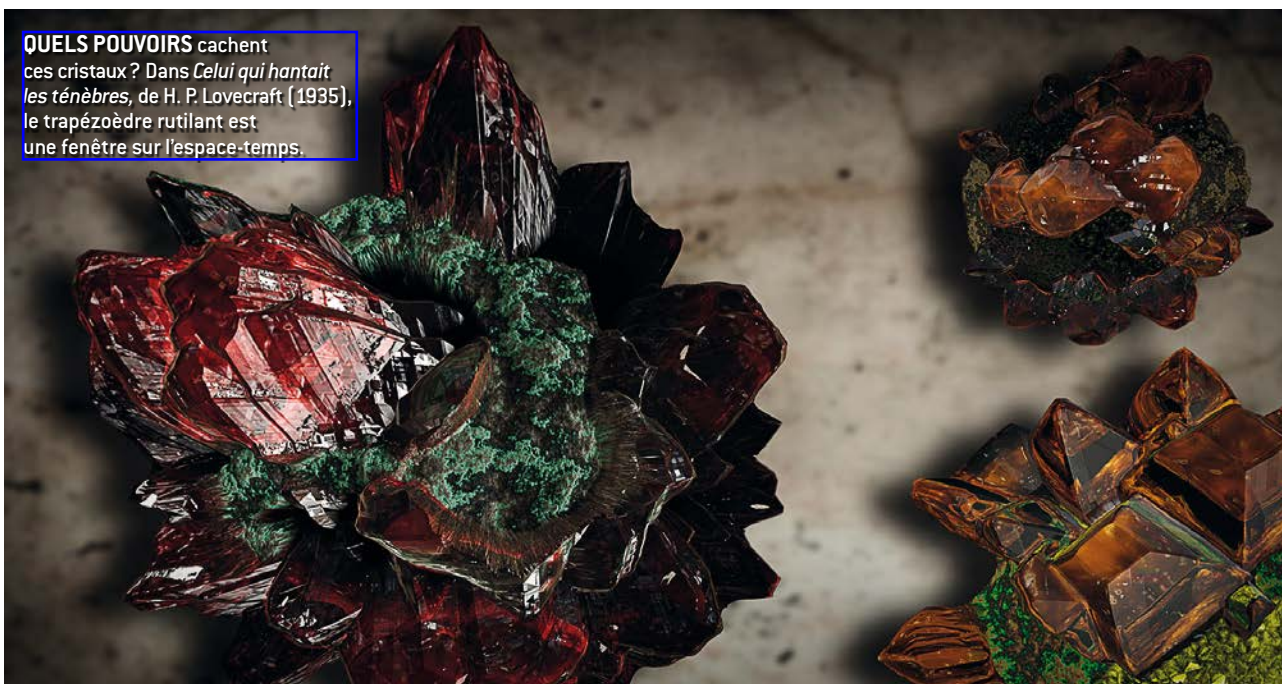
cristaux dans une grotte, une bonne façon de nous rappeler que de nombreux cristaux ont une origine géologique. Dans ce cas, le cristal est un constituant d'une roche. Les plus visibles (on parle de cristaux automorphes) proviennent de roches plutoniques, type de roches dont le magma qui est à leur origine est remonté à faible vitesse : la température a alors lentement baissé, ce qui a laissé le temps aux atomes de s'organiser en un réseau régulier. La texture de la roche ainsi cristallisée est dite grenue. Dans les roches volcaniques, en revanche, le refroidissement de la lave est souvent brutal ; les atomes se figent dans des positions quelconques et la matière prend une texture vitreuse, dans laquelle les cristaux ne forment guère de structures visibles à grande échelle : on parle de cristaux xénomorphes et de roche à texture vitreuse.

Notons que des roches sédimentaires et métamorphiques (transformées sous l'effet de la pression ou de la température) peuvent aussi présenter de magnifiques cristaux, souvent nommés néocristaux, car ils sont formés secondairement, après la formation de la roche elle-même (tels certains cristaux de calcite).

Dans *Voyage au centre de la Terre* de Jules Verne (1864), les explorateurs, dont le charismatique Otto Lidenbrock, professeur de minéralogie, découvrent une grotte ornée de cristaux géants, aux faces nettes et aux angles saillants. Décrits par Jules Verne comme des quartz, ils sont plutôt représentés,

QUELS POUVOIRS cachent ces cristaux ? Dans *Celui qui hantait les ténèbres*, de H. P. Lovecraft (1935), le trapézoèdre rutilant est une fenêtre sur l'espace-temps.

© 2016 MATH BOULAY / PIERRE BOULAY / POSTAL PRODUCTIONS.COM



dans les gravures de l'époque, réalisées par Édouard Riou, sous la forme de gypses. Sa vision est peut-être plus réaliste car, près de deux siècles plus tard, en 1999, des mineurs ont découvert la fameuse *cueva de los Cristales* (grotte des Cristaux) dans la mine de Naica, au Mexique. Considérée comme l'une des plus belles merveilles souterraines du monde, cette grotte abrite des cristaux de gypse de plus de 11 mètres de haut, 1 mètre de diamètre et 55 tonnes ; le temps nécessaire à leur formation est estimé à 600 000 ans !

Les cristaux peuvent aussi apparaître isolément, auquel cas on parle de monocristaux. C'est le cas des grands quartz translucides qui émergent des paysages fantastiques du dessinateur Jean Giraud *alias* Moebius, et qui évoquent d'étranges monolithes plantés au milieu de nulle part. Pour un minéralogiste inspiré, les grands monolithes de *2001, L'Odyssée de l'espace* (Stanley Kubrick et Arthur C. Clarke, 1968), des bornes informant les extraterrestres de l'évolution humaine, pourraient être des monocristaux géants de muscovite, sorte de mica noir. Ils rappellent ceux du roman *Cristal qui songe* (Theodore Sturgeon, 1950), où un cruel misanthrope étudie de mystérieux cristaux – en fait des êtres extraterrestres – à de sombres fins puisqu'il s'agit non plus de guider l'humanité, mais de la détruire.

L'origine d'un cristal n'est pas toujours géologique. Certains organismes vivants en fabriquent. C'est le cas avec l'aragonite des

mollusques (présente dans la coquille ou dans une structure interne nommée rostre), ou encore avec l'apatite dans les dents de vertébrés. Ces cristaux logés à l'intérieur même du corps rappellent ceux implantés sous la peau dans *L'Âge de cristal* (William Nolan et George Johnson, 1967) : dans ce roman à l'origine d'un film et d'une série, les humains habitent des villes-bulles où ils mènent des vies confortables, mais limitées à trente ans pour éviter la surpopulation. Pour contrôler leur durée de vie, des cristaux sont implantés dans la paume de la main et changent de couleur lorsqu'arrive l'anniversaire fatidique.

Des cristaux liquides font le jour et la nuit

Encore plus étonnant, un cristal peut être liquide : cet état très particulier de la matière combine les propriétés d'un liquide et celles d'un cristal. Ces propriétés varient beaucoup selon la nature des composés mais aussi selon leur température, leur pression et leur concentration. Une telle « plasticité » cristalline est utilisée dans plusieurs domaines. En particulier, les cristaux liquides sont à la base des écrans LCD (*liquid crystal display*) aujourd'hui omniprésents. En médecine, certains cristaux liquides dits cholestériques sont utilisés pour cartographier des anomalies thermiques du corps que la radiographie ne détecte pas et qui peuvent signaler des tumeurs.

Sur la planète Omale, du livre-univers éponyme de Laurent Genefort (2001), des sortes de cristaux liquides phototropes (variant avec la lumière) sont présentes dans la haute atmosphère où ils régulent astucieusement, en fonction de leur cycle de polarisation, l'alternance du jour et de la nuit.

Enfin, les propriétés optiques des cristaux sont sans doute à l'origine de leur statut de talismans, objets aux pouvoirs surnaturels ou aux « énergies » diverses qui nourrissent superstitions, paramédecine et autres pseudosciences. Par exemple, le terme « améthyste » viendrait du grec ancien pour désigner une sorte de dégrisement, de désintoxication. Au Moyen Âge encore, des gobelets d'améthyste étaient supposés protéger des boissons empoisonnées !

L'idée fausse selon laquelle les cristaux seraient « énergétiques » reste tenace. Dans la fiction, elle est un prétexte inoffensif – source d'énergie pour le sabre laser des Jedi de *Star Wars* ou source de vie pour les êtres du monde de *Dark Crystal* (Jim Henson et Frank Oz, 1982). Dans la réalité, en revanche, il faut s'inquiéter de certaines pratiques comme la « géobiologie » ou la radiesthésie, qui se définissent comme sciences sans en utiliser la démarche et qui affirment, par exemple, que les cristaux ont un pouvoir de guérison. ■

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

ART & SCIENCE

Bienvenue en Floride !

Pour élaborer ses œuvres, l'artiste canadien Étienne Saint-Amant utilise des fonctions chaotiques, des tractogrammes d'imagerie cérébrale, le mouvement brownien... : la science est bel et bien un instrument de création.

Loïc MANGIN

Les habitués des longs couloirs de correspondance de la station Montparnasse-Bienvenue ont peut-être pris le temps, fin 2015, d'admirer les 134 mètres de la gigantesque et bien nommée fresque *Le couloir du temps*. Grâce à la RATP et au CNRS, les usagers du métro parisien pouvaient découvrir le rôle des mathématiques, de la chimie, de la biologie, de l'informatique... dans les processus par lesquels un objet, une pratique ou un lieu se transforment en un élément du patrimoine. Au milieu des robots, satellites, carottes de glaces, enluminures, fossiles, spécimens d'insectes, on pouvait admirer *La nature cristalline de la matière et de l'espace*, du Québécois Étienne Saint-Amant.

L'œuvre, créée en 2015, résulte de la collaboration de l'artiste avec le Laboratoire nanotechnologies et nanosystèmes et l'Institut interdisciplinaire d'innovation technologique, deux institutions canadiennes. Ce n'est pas une première et, de fait, la science a la part belle dans les tableaux d'Étienne Saint-Amant. Quelques exemples suffisent à s'en convaincre.

Autoportrait II ressemble à un arbre ou à une chevelure (*ci-contre, a*). Il s'agit plutôt d'un tractogramme de substance blanche ! Expliquons. Le peintre a suivi une formation en imagerie cérébrale et a eu l'occasion de donner un peu de son corps à la science. En l'occurrence, il a subi une IRM par tenseur de diffusion, une méthode qui met en évidence les faisceaux de fibres de la ma-

tière blanche (constituée essentiellement des axones des neurones du cerveau, elle s'oppose à la matière grise). De la sorte, on accède aux câblages entre les différentes régions cérébrales. L'image obtenue, ici avec les équipes du Laboratoire d'imagerie de la connectivité de Sherbrooke, au Canada, est un tractogramme qui a ensuite été modifié artistiquement. *Autoportrait II* révèle bien la personnalité intime de son auteur !

Le tableau *Elles tiennent (b)* s'appuie non pas sur la biologie, mais sur des mathématiques. Cette composition est constituée de plusieurs couches géométriques superposées,

En 2010, Étienne Saint-Amant représentait le Canada à l'Exposition universelle de Shanghai, en Chine

chacune étant décrite mathématiquement sur le plan complexe. Les couleurs sont déterminées en fonction d'une propriété donnée selon une règle d'association pouvant varier d'une couche à l'autre.

Parexemple, les séries de bandes jaunâtres sont fondées sur une généralisation de la fonction dite de la tente (*Tent map* en anglais). Cette fonction s'exprime ainsi : $x_{n+1} = f_{\mu}(x_n)$, où $f_{\mu}(x) = \mu \min(x, 1-x)$, c'est-à-dire le produit d'un paramètre μ par la plus petite valeur parmi x ou $1-x$. Derrière cette simplicité se cache un comportement chaotique semblable à celui observé avec la fonction logistique

définie par $x_{n+1} = rx_n(1-x_n)$ où r est également un paramètre fixé. Selon les valeurs du paramètre μ (ou r), la suite converge, oscille ou devient chaotique. La généralisation de la *Tent map* est utilisée pour créer des fractales, par exemple la *General Tent Julia*.

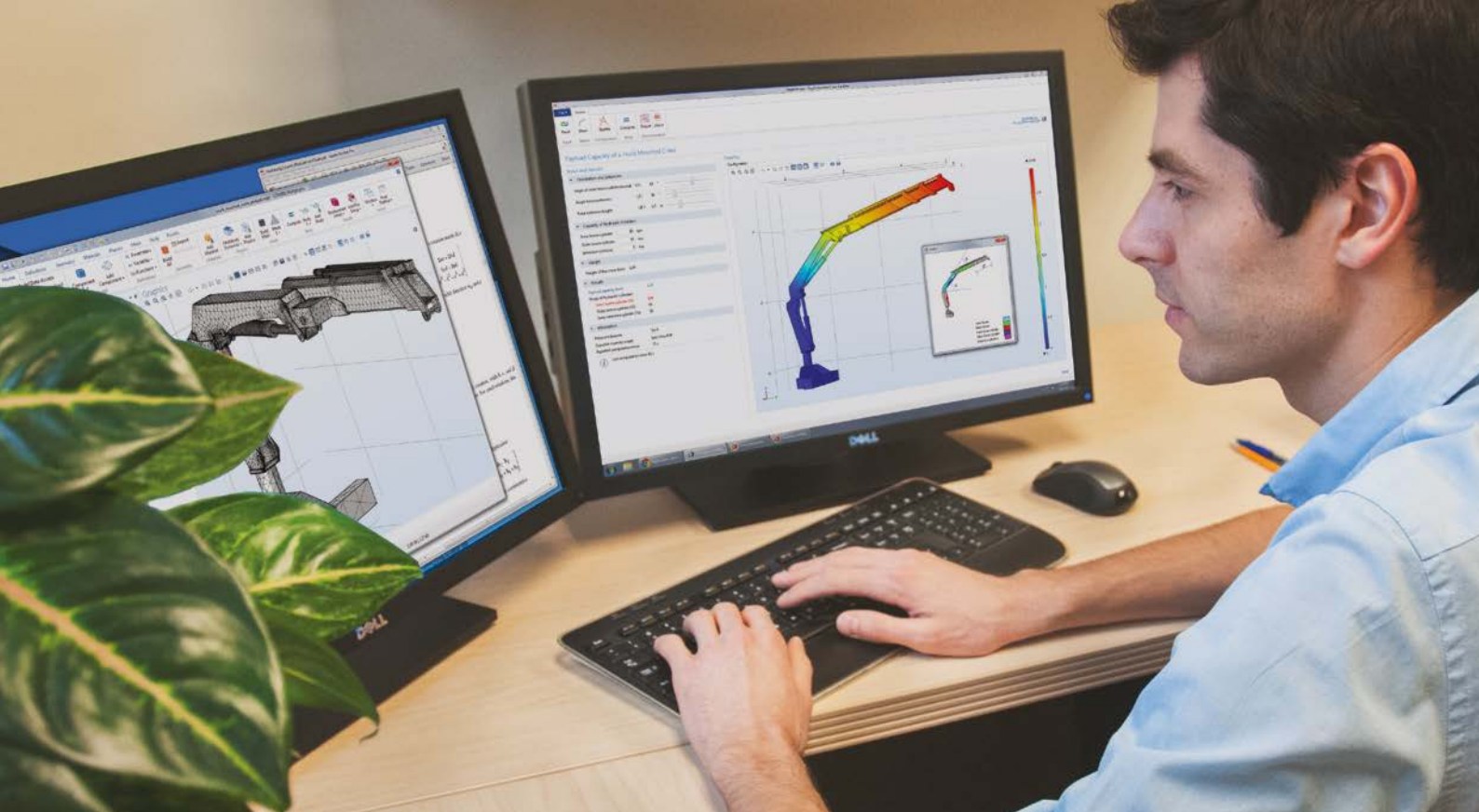
De là, Étienne Saint-Amant joue sur les paramètres de coloration pour obtenir le rendu souhaité, par exemple les petites lames qui se fondent dans le bleu turquoise en bas de l'œuvre. Toujours dans *Elles tiennent*, les nuages centraux résultent d'un système de mouvement brownien.

The Key (ci-contre, c) est un hommage à la lumière et aux paysages de l'archipel des Keys, au sud de la Floride. La méthode générale mise en œuvre ici ressemble beaucoup à celle de *Elles tiennent*, avec néanmoins une utilisation plus importante des réflexions pour accentuer les effets d'eau.

Dans d'autres œuvres, c'est par exemple la distance de Levenshtein qui préside à la création. Cette notion mathématique est notamment utilisée pour comparer des séquences d'ADN. Ainsi, outre les couleurs, l'artiste a élargi sa palette en y intégrant des outils venus des mathématiques, de l'imagerie médicale, de la physique... C'est un nouvel exemple où la science devient un instrument de création artistique. ■

Toutes les œuvres d'Étienne Saint-Amant figurent sur son site : <http://chaoscopia.com>
La version interactive du *Couloir du temps* : <http://bit.ly/PLS-CNRS-Couloir>





LA MULTIPHYSIQUE POUR TOUS

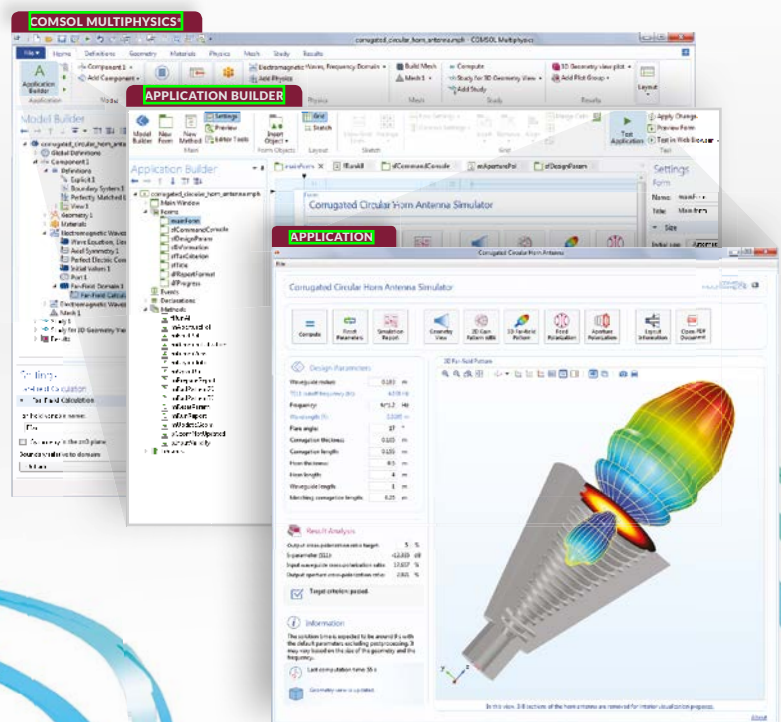
L'évolution des outils de simulation numérique vient de franchir un cap majeur.

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

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

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

comsol.fr/application-builder



IDÉES DE PHYSIQUE

L'énergie du sel

L'osmose entre eau douce et eau salée séparées par une membrane imperméable au sel peut être la source d'une nouvelle énergie renouvelable.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Gâce à son sel, chaque mètre cube d'eau de mer a le potentiel de fournir une énergie de près de un kilowattheure ! Comment ? En mettant à profit la pression dite osmotique qui naît lorsqu'on met en contact de l'eau douce et de l'eau de mer à travers une paroi ne laissant passer que l'eau. La récupération de cette énergie liée au phénomène d'osmose n'en est qu'à ses balbutiements, mais les perspectives sont alléchantes : compte tenu des énormes quantités d'eau déversées dans les océans par les fleuves, on évalue le potentiel mondial pour cette énergie à deux térawatts, soit l'équivalent de 2 000 cœurs de réacteur électronucléaire. Mais au fait, qu'est-ce que l'osmose ?

Pression osmotique

Nous avons tous rencontré ce phénomène à une occasion ou une autre. Par exemple, on saupoudre souvent de sel les concombres ou les aubergines pour les faire dégorger, c'est-à-dire pour qu'ils se vident d'une partie de leur eau. Inversement, en plaçant dans de l'eau pure des fleurs aux tiges ramollies, celles-ci absorbent de l'eau et se raffermissent.

Pourquoi ces mouvements d'eau, que l'on peut reproduire très simplement avec une pomme de terre (voir ci-contre) ? Ils apparaissent lorsque la concentration en sel de l'intérieur

LES AUTEURS

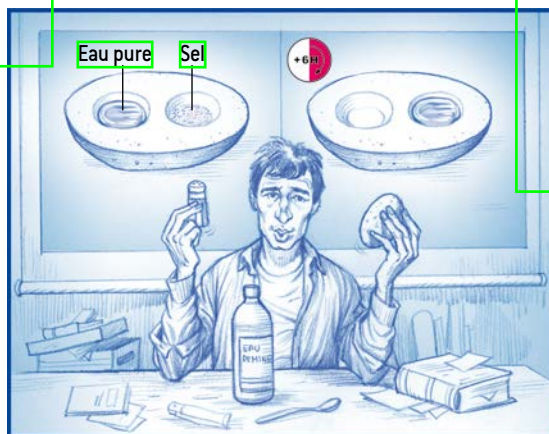


Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'université Pierre-et-Marie-Curie, à Paris. Leur blog : www.scilogs.fr/idees-de-physique/

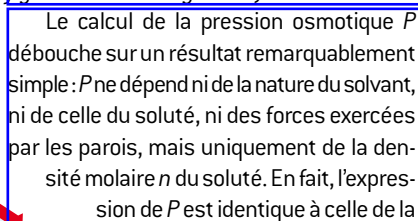
des cellules végétales (9 grammes par litre) diffère de la concentration du liquide ambiant, sachant que les membranes cellulaires sont « hémiperméables » : elles laissent passer l'eau, mais pas le sel. L'eau s'écoule alors dans le sens qui permet de diminuer la différence des concentrations en sel.

Pour comprendre comment agissent ces membranes, considérons un récipient ouvert, séparé en deux compartiments par une paroi hémiperméable dans sa partie inférieure. L'un des compartiments contient un solvant pur, de l'eau par exemple, tandis que l'autre contient le solvant et, en faible concentration, un soluté incapable de traverser la paroi – du sel par exemple. Cela signifie que la paroi exerce d'une façon ou d'une autre une force très répulsive sur les molécules du soluté quand elles s'en approchent. Ainsi seul le solvant peut traverser la paroi hémiperméable, dans un sens comme dans l'autre.

Cette dissymétrie des forces exercées par la paroi sur le solvant et le soluté a deux conséquences. La première concerne la situation d'équilibre. Faisons dans ce cas un bilan des forces de part et d'autre de la cloison. Du côté du solvant pur, la force totale est celle exercée par la paroi sur les molécules du solvant. Dans l'autre compartiment, certaines molécules du solvant sont remplacées par des molécules de soluté ; or pour celles qui sont proches de la paroi, la force est, en moyenne, répulsive



L'OSMOSE EN PATATES. Creusons deux cavités dans une moitié de pomme de terre, l'une qu'on remplit d'eau pure, l'autre où l'on met un peu de sel. Quelques heures plus tard, la première cavité s'est vidée, tandis que la seconde s'est remplie d'eau. C'est la manifestation de l'osmose, qui tend à égaliser les concentrations en sel de part et d'autre d'une membrane perméable à l'eau mais imperméable au sel.



Quelle différence de pression peut-on alors espérer avec de l'eau pure et de l'eau salée ? Pour un gaz à température ambiante, on a une pression de 1 bar lorsque sa densité est d'environ 0,04 mole par litre. Pour du chlorure de sodium (sel de table), dont la masse molaire est de 58 grammes par mole et en prenant en compte le fait qu'il y a deux ions (Na^+ et Cl^-) par mole de sel, cela correspond à une masse d'un peu moins de 1,2 gramme. On a donc, en gros, 1 bar pour 1 gramme de sel par litre. Or 1 bar est l'équivalent de la pression d'une colonne d'eau de 10 mètres. Avec de l'eau de mer à 30 grammes de sel par litre, on aura par conséquent 30 bars, soit une hauteur d'eau de 300 mètres !

Comment exploiter la pression osmotique pour réaliser une centrale électrique ? Imaginons que, à l'embouchure d'une rivière, on place deux réservoirs séparés par une membrane hémiperméable, l'un alimenté par l'eau salée de la mer, l'autre par l'eau douce de la rivière. L'eau douce est alors pompée par le réservoir « salé » qui se remplit jusqu'à une hauteur de 300 mètres, un dénivelé idéal pour installer un barrage hydroélectrique. En pratique, pas besoin de construire une structure aussi haute : l'eau sous pression du côté salé peut directement faire tourner une turbine génératrice d'électricité *[voir la figure ci-contre]*.

Le principe est aisé, mais la réalisation est délicate. L'obstacle principal est le flux d'eau que l'on peut obtenir. Dans une vision très simplifiée, une membrane hémiperméable fonctionne comme un tamis moléculaire : ses pores sont assez étroits pour laisser passer les molécules d'eau, mais pas les ions et les molécules qu'ils entraînent. Les pores étant nanométriques, les débits attendus sont faibles, de l'ordre du millilitre par seconde et par mètre carré de membrane. En termes de puissance, cela correspond à 3 watts par mètre carré.

Pour faire tourner une turbine, il faut donc une surface considérable de parois. Le prototype construit en Norvège par Statkraft

ON PEUT PRODUIRE DE L'ÉLECTRICITÉ en mettant sous pression de l'eau salée (eau de mer) grâce à l'osmose, qui fait entrer de l'eau douce dans le compartiment d'eau salée. Cette eau sous pression, devenue saumâtre, est partiellement évacuée à travers une turbine, qui produit de l'électricité. Une autre partie passe à travers un dispositif qui permet de transférer son excès de pression à l'eau de mer qui alimente le circuit.

présente ainsi une superficie totale de 2 000 mètres carrés, pour un débit de quelques litres par seconde et une puissance évaluée à quelques kilowatts.

Une seconde difficulté est le renouvellement de l'eau salée. À mesure que le réservoir « salé » se remplit, la salinité de son eau diminue. Il faut renouveler cette saumure, de plus en plus diluée et qui chute en pression, par l'eau salée de la mer. Or cette saumure est sous pression par rapport à l'eau de la mer, à pression atmosphérique. Pour ne pas gaspiller trop d'énergie dans ce processus, les ingénieurs ont inventé des « échangeurs de pression », un analogue mécanique des échangeurs de chaleur, qui permettent de passer de la situation « eau salée à faible pression et saumure sous pression » à l'objectif « eau salée sous pression et saumure à faible pression ».

Quant aux perspectives industrielles, on estime qu'une centrale osmotique sera rentable à partir de 5 watts par mètre carré de paroi hémiperméable. Les performances actuelles n'étant pas très éloignées, les ingénieurs cherchent à améliorer les procédés. Une autre piste suivie par les physiciens est d'améliorer les parois grâce à une meilleure compréhension des écoulements ou des transports de particules à l'échelle nanométrique.

Récemment, l'équipe de Lydéric Bocquet, du CNRS et de l'université Lyon 1, a ainsi étudié l'écoulement osmotique de l'eau à travers un tube de nitrure de bore de quelques dizaines de nanomètres de diamètre. Il s'effectue presque sans frottement, avec un potentiel de 4 kilowatts par mètre carré. Ce résultat ne concerne qu'un nanotube, certes, mais montre que de grands progrès sont possibles du côté des membranes hémiperméables.

BIBLIOGRAPHIE

A. Siria *et al.*, Giant osmotic energy conversion measured in a single transmembrane boron nitride nanotube, *Nature*, vol. 494, pp. 455-458, 2013.

B. E. Logan et M. Elimelech, Membrane-based processes for sustainable power generation using water, *Nature*, vol. 488, pp. 313-319, 2012.



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



Dans l'interêt de la science



mathieu vidard

la tête au carré
14:05-15:00



intervenez

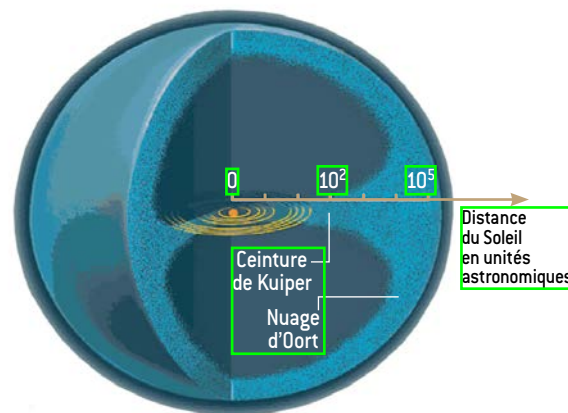
franceinter.fr

QUESTION AUX EXPERTS

D'où viennent les comètes ?

Ces corps célestes glacés sont issus de trois « réservoirs » du Système solaire : le nuage d'Oort, la ceinture de Kuiper et la ceinture principale d'astéroïdes.

Alain DORESSOUNDIRAM



Les comètes sont des petits corps glacés en orbite autour du Soleil. Avec les astéroïdes, elles constituent l'ensemble des petits corps du Système solaire, des vestiges de la formation du Soleil et des planètes il y a 4,6 milliards d'années. On confond souvent les comètes avec les étoiles filantes ou les météorites. Un météore ou une étoile filante est le phénomène lumineux associé au passage d'un corps – grain de sable, astéroïde... – dans la haute atmosphère. Une météorite est un fragment d'astéroïde qui arrive intact sur Terre. Et une comète est un corps glacé qui s'évapore en s'approchant du Soleil.

Les comètes sont composées de glaces (essentiellement d'eau, mais aussi de méthane, de monoxyde ou dioxyde de carbone) mélangées à de la poussière [des silicates] et des molécules organiques – lesquelles font l'intérêt de ces corps pour ceux qui étudient l'apparition de la vie sur Terre.

Une comète se distingue d'un astéroïde par le fait que c'est un objet actif, donc variable. À l'approche du Soleil, sa surface chauffe, les glaces se subliment, libérant des poussières qui forment alors la « chevelure », ou coma, faiblement retenue par la gravité. La coma s'étend ainsi en halo, de diamètre allant jusqu'à 10 000 kilomètres, autour de la comète. En s'approchant encore du Soleil, le gaz de la coma est ionisé par les ultraviolets de notre étoile. Le vent solaire (vent de particules chargées) repousse alors les ions dans la direction opposée, formant une queue de plasma. La pression de

radiation du Soleil [flux de lumière] repousse les poussières et forme une seconde queue. Ces deux queues s'étendent parfois jusqu'à 100 millions de kilomètres et concourent à la majesté du phénomène.

Les comètes doivent s'être formées très loin du Soleil, là où les glaces ont pu se condenser, puis s'agglomérer en corps plus gros. En observant les trajectoires des comètes, qui arrivent de toutes les directions, l'astronome néerlandais Jan Oort, dans les années 1950, imagina un réservoir lointain et sphérique : le nuage d'Oort. Peuplée de quelque 1 000 milliards de comètes, cette sorte de coquille entourant le Système solaire serait distante de 10 000 à 100 000 unités astronomiques du Soleil (une unité astronomique, UA, est la distance moyenne Terre-Soleil, environ 150 millions de kilomètres).

Des réservoirs identifiés il n'y a pas si longtemps

Cependant, le flux de comètes présente un excès de celles qui arrivent dans le plan de l'écliptique (le plan moyen des orbites planétaires). Dans les années 1980, l'astronome uruguayen Juan Fernández suggéra alors l'existence d'un second réservoir, beaucoup plus proche et, surtout, situé dans le plan de l'écliptique : la ceinture de Kuiper. Ce réservoir ne fut observé qu'en 1992, par les Américains Dave Jewitt et Jane Luu.

Comme les autres objets du Système solaire, les comètes décrivent des ellipses

autour du Soleil. Mais à la différence des planètes et des astéroïdes, ces orbites sont très allongées. Selon leur origine, on distingue deux grandes familles de comètes.

Les comètes écliptiques proviennent de la ceinture de Kuiper. Elles en ont été éjectées par les perturbations gravitationnelles dues à Neptune. L'inclinaison de leur orbite par rapport à l'écliptique est faible et leur période de révolution courte (inférieure à 200 ans). La comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko, actuellement étudiée par la sonde *Rosetta*, fait partie de cette famille.

Les comètes quasi isotropiques proviennent du nuage d'Oort. Leurs périodes sont en général très longues, et leurs orbites très inclinées et souvent rétrogrades (en sens inverse du sens des planètes). Un représentant célèbre est la comète de Halley.

Des découvertes très récentes font état de la présence de comètes au sein même de la ceinture principale d'astéroïdes, entre Mars et Jupiter. Comment expliquer l'activité de ces « comètes de la ceinture principale », ou CCP, activité qui les distingue des astéroïdes ? Les scientifiques sont encore perplexes. La glace d'eau, à cette faible distance du Soleil (entre 3 et 4 UA), est instable. Il peut en revanche subsister des poches de glace sous la surface d'un astéroïde. Des impacts peuvent alors révéler la glace souterraine et « activer » l'astéroïde, qui devient alors comète. ■

Alain DORESSOUNDIRAM est astrophysicien à l'observatoire de Paris, au laboratoire LESIA.

OFFRE DÉCOUVERTE

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE



1 AN - 12 N°s
59€
24% d'économie

2 ANS - 24 N°s
110€
29% d'économie

3 ANS - 36 N°s
159€
32% d'économie

BULLETIN D'ABONNEMENT

POUR LA SCIENCE

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

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

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

MES COORDONNÉES

Nom : _____
Prénom : _____
Adresse : _____
Code postal : _____
Ville : _____
Tél. : _____
Pour le suivi client (facultatif)

MON MODE DE RÈGLEMENT

- ☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science
- ☐ Par carte bancaire

N° _____
Date d'expiration _____ Clé _____

Signature obligatoire

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

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

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

Délai de livraison: dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31/05/16 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site www.pourlascience.fr. Conformément à la loi "Informatique et libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à Pour la Science.



PAS463B

SCIENCE & GASTRONOMIE

Le beurre est bon, qu'il soit cru ou noisette

N'ayons pas de scrupules à cuisiner et à consommer du beurre : il n'est pas toxique, même quand il est noisette.

Hervé THIS



Les rumeurs nutritionnelles vont bon train. Les poissons seraient toxiques, les viandes seraient dangereuses, les fruits et légumes seraient pleins de pesticides, le sucre blanc serait terrible, les produits alimentaires industriels seraient des poisons que des compagnies diaboliques additionneraient de produits addictifs, le gluten trouerait l'estomac, le faux fromage des pizzas serait une fraude de l'industrie chimique, la margarine serait pleine d'« acides gras trans », l'huile serait meilleure que le beurre, etc.

Or une étude récente de Frédéric Tessier, Céline Niquet-Léridon et leurs collègues à Lille et Beauvais réhabilite le beurre cru ou noisette (*Food Chemistry*, vol. 177, pp. 361-368, 2015).

Parmi les composés potentiellement toxiques qui apparaissent lors des cuissons, la carboxyméthylllysine (CML) est un marqueur de toxicité largement utilisé. Ce composé se forme à partir de l'acide aminé lysine, et c'est un marqueur des réactions de Maillard, ces brunissements qui apparaissent quand des protéines ou des peptides sont chauffés en présence de sucres réducteurs (glucose, fructose...). Les chimistes se sont aussi intéressés au 5-hydroxyméthylfurfural (5-HMF), qui apparaît également lors des réactions de Maillard, mais pas seulement : il se forme aussi quand on chauffe certains sucres en solution aqueuse, lors de la caramélisation des sucres, etc.

Des chimistes américains avaient cru que la CML et le 5-HMF apparaissaient lors de la cuisson des aliments riches en matières

grasses, tels l'huile d'olive et le beurre cru. Cela avait de quoi surprendre, car il n'y a pas de lysine dans l'huile d'olive (des traces, tout au plus) et le beurre clarifié ne brunit pas. Aussi les chimistes français ont-ils décidé d'examiner les faits.

Les cuisiniers professionnels ne mettent que rarement le beurre dans la poêle avec la viande ou le poisson, car le beurre charbonne alors désagréablement. Soit ils limitent la cuisson au stade du beurre noisette, soit ils utilisent le beurre clarifié.

Dans le premier cas, une fois que le beurre a fondu et libéré quelque 12 % de petit-lait (avec protéines, lactose, etc.), le chauffage de cette phase plus dense que la matière grasse conduit à l'évaporation de l'eau (d'où les projections et le bruit de grésillement) et au brunissement, lequel s'accompagne évidemment de modifications chimiques. Pour éviter que le beurre ne charbonne, les cuisiniers ajoutent un liquide aqueux (bouillon, vin, jus de citron, etc.), qui limite la température à 100 °C.

L'autre manière est la clarification du beurre : on chauffe doucement le beurre, on élimine l'écume qui vient en surface et on récupère la phase grasse, qui, débarrassée de ses matières sujettes à décomposition, ne brunit plus.

Pourquoi toutes ces contorsions culinaires, alors que l'huile ou la margarine permettraient des chauffages sans brunissement ? Parce que le beurre est chargé de composés odorants et sapides, dont les huiles les plus raffinées ou les margarines sont dépourvues. Reste la question de la formation éventuelle de composés toxiques.

Les chimistes ont repris les dosages par chromatographie en phase liquide couplée à des spectrométries de masse. Ils ont cuit des beurres à 150 °C ou 180 °C, pendant des temps suffisants pour observer la formation d'une couleur brune, ou pendant le double de ce temps. Par ailleurs, ils ont cuit des aliments dans les matières grasses et dosé les deux marqueurs, CML et 5-HMF.

Par rapport au beurre cru, nos chimistes ont observé une légère augmentation de la concentration en CML. Quant au 5-HMF, il n'a été observé ni dans le beurre cru ni dans le beurre clarifié cuit, mais dans les beurres chauffés.

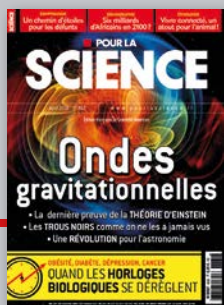
Or pour un adulte, qui consomme en moyenne 5 milligrammes (mg) de CML par jour, une contribution de 0,06 mg issue de 20 grammes de beurre chauffé à l'excès est négligeable. Pour le 5-HMF, l'apport reste faible (0,6 mg pour 20 grammes de beurre chauffé 6 minutes à 180 °C, sur un total de 5 à 10 mg par jour dans l'alimentation). Cessons donc de basculer systématiquement du côté d'OC et n'hésitons pas à cuisiner du beurre ! ■



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



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



N°462 - avril 2016
 ☐ réf. M0770462



N°461 - mars 2016
 ☐ réf. M0770461



N°460 - février 2016
 ☐ réf. M0770460



N°459 - janvier 2016
 ☐ réf. M0770459



N°458 - décembre 2015
 ☐ réf. M0770458



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

Complétez votre collection dès maintenant!

Merci de découper ou photocopier ce bulletin et de le 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 2^e acheté.

Je reporte ci-dessous les références à 8 chiffres correspondant aux numéros commandés :

1^{re} réf. 01 x 5,50 € = 6,50 €
 2^e réf. _____ x 5,50 € = _____ €
 3^e réf. _____ x 5,50 € = _____ €
 4^e réf. _____ x 5,50 € = _____ €
 5^e réf. _____ x 5,50 € = _____ €
 6^e réf. _____ x 5,50 € = _____ €

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

Je commande la reliure **Pour la Science** (capacité 12 n°s) au prix de 14 € x 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.**

TOUTES LES ARCHIVES DEPUIS 1996 SUR
www.pourlascience.fr

HISTOIRE DES SCIENCES

Le Monde de Darwin

Guillaume Lecointre
et Patrick Tort (dir.)

La Martinière/Cité des Sci., 2015
[192 pages, 29,90 euros].

Ce livre, publié à l'occasion d'une exposition à la Cité des sciences, veut présenter Charles Darwin et son œuvre dans leur globalité, à travers neuf chapitres dus à sept auteurs.

On y trouve donc de nombreux éléments biographiques, depuis l'enfance et la jeunesse du naturaliste, dans une famille provinciale aisée aux tendances intellectuelles prononcées, jusqu'à son existence de rentier fortuné dans le village de Downe, où il éleva sa nombreuse famille tout en produisant son immense œuvre scientifique, en passant bien sûr par son long voyage autour du monde à bord du *Beagle*, au cours duquel il commença à accumuler les données scientifiques sur lesquelles il devait bâtir sa théorie. Est également abordée l'influence de la théorie de l'évolution sur la littérature et les arts, dans des chapitres servis par la superbe iconographie qui rend l'ensemble de l'ouvrage très attrayant.

En ce qui concerne l'œuvre scientifique de Darwin, l'accent est mis naturellement sur ce qui en constitue le cœur, à savoir la théorie de l'évolution par sélection naturelle.

Contrairement à beaucoup d'autres ouvrages sur Darwin, le livre dit peu de chose sur la genèse de cette théorie et s'attache plutôt à l'analyser, d'une façon bien française et plutôt différente de la plupart des études sur la question par des auteurs britanniques. Ainsi, Guillaume Lecointre théorise les idées de Darwin d'une façon très abstraite, qui contraste avec les démonstrations fondées sur une foule de faits concrets qui caractérisent les œuvres du naturaliste anglais. De même, lorsque Patrick Tort s'attaque à juste titre aux nombreuses idées fausses qui circulent autour du darwinisme, il le fait d'un point de vue que l'on peut considérer comme militant. Cependant, il est bien connu que le risque existe lorsqu'on combat un dogme... d'en créer un soi-même ! Conçue comme un combat assez explicite à la fois contre la religion et contre ce que l'on peut résumer sous le vocable de sociobiologie, l'interprétation de l'œuvre de Darwin que donne ce livre est certes fort intéressante, mais le lecteur doit savoir qu'il en existe d'autres.

Eric Buffetaut
CNRS, ENS, Paris

MATHÉMATIQUES

Les Maths au tribunal

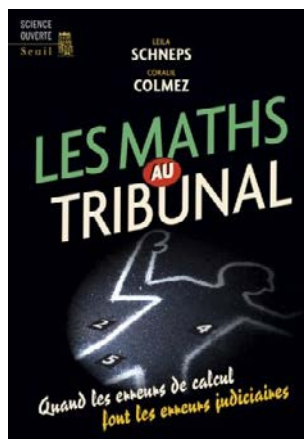
Leila Schneps et Coralie Colmez

Seuil, 2015
[288 pages, 20 euros].

Mathématiciennes, les auteures sont des chevaliers blancs : elles traitent avec clarté des erreurs mathématiques ayant entraîné des méprises judiciaires. Il y en a de deux types : des erreurs d'interprétations des statistiques et des erreurs logiques.

Il est très difficile d'accepter une preuve fondée sur une coïncidence.

Il peut par exemple se trouver que, par hasard, les spectres ADN du sang relevé sur la victime et celui de l'accusé soient similaires. À partir de quelle probabilité décide-t-on qu'ils coïncident ? 99/100, 999/1000, 9999/10000 ou plus près encore de 1 ? À partir de quelle valeur n'existe-t-il plus de « doute raisonnable » ? Nous ne considé-



rons pas la probabilité de gagner à *Euromillions* comme trop faible, puisque nous jouons ! Pourtant, certaines rares coïncidences, qui pourraient innocenter quelqu'un, sont bien plus probables qu'un gain à *Euromillions*... Nous nous souvenons tous de coïncidences « improbables » que nous avons vécues et qui n'auraient jamais été crédibles si elles avaient dû constituer une preuve d'innocence.

Le problème peut être d'interprétation encore plus délicate pour le juge non mathématicien : la probabilité que les ADN de deux individus soient identiques dans une population de N individus ($N(N-1)/2$ paires) et donc pouvant innocenter l'accusé est beaucoup plus grande que la probabilité que l'ADN de l'accusé soit identique à celui trouvé sur la victime ($N-1$ paires). La première probabilité justifiant une possibilité d'erreur a été invoquée par la défense (à tort) et la seconde par l'accusation (à raison).

D'autres difficultés abordées dans le livre sont de nature logique. Un testament peut-il inclure la disposition que tous les testaments ultérieurs seront irrecevables ? Là encore, la difficulté est de répondre par oui ou par non à la question.

Les auteures analysent aussi avec finesse l'affaire Dreyfus, pendant laquelle la recherche de la vérité fut oblitérée par les conséquences, selon l'armée, que la divulgation de l'innocence de Dreyfus aurait amenées. Les effets de la proclamation d'une vérité ne devraient pas entrer en ligne de compte, pourtant ils pèsent lourdement sur le jugement humain : l'acceptation des preuves n'est jamais dépourvue d'*a priori*.

Ce livre incite à la réflexion et à des constatations qui, si elles nous amusent quelquefois, nous indignent aussi souvent.

Philippe Boulanger

PSYCHOLOGIE

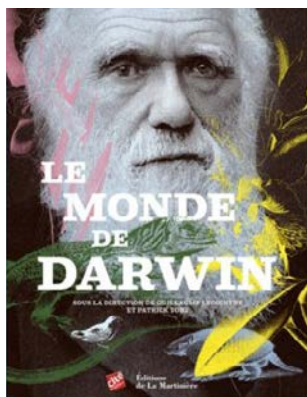
De quelques mythes en psychologie

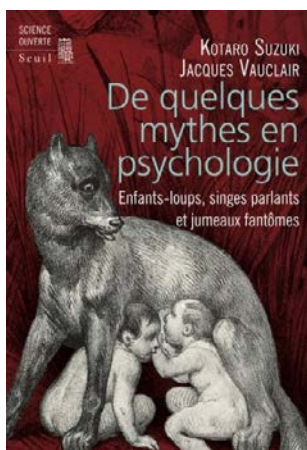
Kotaro Suzuki et Jacques Vauclair

Seuil, 2016
[229 pages, 20 euros].

La question posée au fil de ces pages est fondamentale : peut-on voir la psychologie comme une science exacte ? Le récit documenté de plusieurs expériences révèle les obstacles à l'objectivité des démonstrations en psychologie. Il y en a de plusieurs ordres :

– La récupération des découvertes au profit de certaines théories. Ainsi le retentissement de l'aventure du pasteur Singh qui, recueillant deux fillettes indiennes élevées par des loups, réveille la polémique autour des enfants sauvages. Le psychologue Gesell, cherchant à réconcilier deux théories, innéiste





LITTÉRATURE-ARCHÉOLOGIE

Bâtisseurs de l'oubli

Nathalie Démoulin

Actes Sud, 2015

[208 pages, 18,80 euros]

La Grande Motte, c'est le paradis des archéologues. Dessous le sable, il n'y a rien. Même pas de pétrole. Là, sous les pyramides de béton, c'est enfin les vacances. Pas de serin pour vous poser des questions sur le temps qui passe, pas d'importun pour vous dire : « Dis donc, toi qui t'y connais, si on allait voir le musée Machin ? ». À la Grande Motte, l'archéologue, enfin, est lézard... Mais même ceux qui se rêvent sans passé ont une histoire. C'est la grande leçon du magnifique roman de Nathalie Démoulin, écrit dans une langue puissante et musicale, aussi riche et colorée que celle de l'ami Giono.

Le Languedoc, depuis la Préhistoire, accueille les bannis, les migrants, ceux dont on ne veut plus. Ou les commerçants, dont on ne veut pas non plus mais il faut bien faire avec. Chaque génération, chaque peuple bâtit, défriche, cultive. Puis le Rhône passe. Et le cycle recommence... Marc Barca, le Mama, est un pied-noir arrivé d'Algérie. Il a tout perdu et n'a qu'une ambition : faire comme les Étrusques, les Grecs et les Romains. Bâtir une cité. Utiliser l'expérience du passé d'autrui. « C'est une drôle d'existence que mène un homme sans mémoire dans un pays de vestiges, alors que le passé ressort par tous les bouts, et il a beau ne pas être dans ce passé-là, Marc Barca, de ce côté-là au moins de la

Méditerranée, il ne peut pas ne pas s'y reconnaître. » Marc comme les autres construit pour l'éternité. Il court les chantiers, brasse de multiples projets, plus fous les uns que les autres. La Grande Motte, « ville de marchands de sable », c'est lui. Enfin, lui qui donne corps aux rêves de Jean Balladur, l'architecte fasciné par le temple du Soleil de Teotihuacán. Un autre passé, encore. Exotique celui-ci. Les gens rient, se moquent. Mais les immeubles sortent de terre. En dix ans. Et les touristes rappliquent.

Marc, comme ses prédécesseurs, et comme se plaît à lui rappeler Simon l'archéologue, son



meilleur ennemi, n'avait oublié qu'une chose, mais de taille : le Rhône est toujours là. Et le vent. Et la Méditerranée. Le réchauffement climatique amène d'autres charretées de migrants, fait monter les eaux. Tout va disparaître à nouveau. On n'échappe pas au passé. Même quand on n'en a plus. Il nous rattrape et nous transforme. Qui sommes-nous, sinon du futur gibier d'archéologues ?

Romain Pigeaud

Chercheur associé

à l'université de Rennes I



Qu'est-ce que la technologie ?

Dominique Raynaud

Matérialogiques, 2016

[312 pages, 25 euros]

Cet essai discute de la technologie entendue comme l'ensemble des techniques fondées sur des connaissances scientifiques ; il associe les points de vue philosophique, historique et sociologique pour passer en revue les difficultés empêchant son étude et les phénomènes - interactions avec la science, production des connaissances technologiques, idéologies utilitaristes ou autres, propagandes à contenu technologiques, etc. - qui participent de son évolution. Le livre se termine par une très intéressante synthèse sur le devenir des technologies.



Le Génie de Pasteur au secours des poilus

A. Perrot et M. Schwartz

Odile Jacob, 2016

[283 pages, 24,90 euros]

Le génie vraiment évoqué ici est celui des disciples de Pasteur lorsqu'ils ont fait face aux conséquences sanitaires de la Grande Guerre. Passant d'un épisode à l'autre, évoquant Albert Calmette, Marie Curie, Alexandre Yersin et de nombreux autres pastoriens, les auteurs nous font saisir l'effrayant nombre de problèmes alors affrontés dans l'urgence extrême. Il devient clair au fil des pages de ce solide récit que, sans les pastoriens, des centaines de milliers de poilus de plus seraient morts, ce qui aurait pu changer le cours de la guerre.



Le Gyptis

P. Pomey et P. Poveda (dir.)

CNRS Éditions, 2015

[144 pages, 20 euros]

En 1993, on découvrait

À Marseille les restes bien conservés d'un bateau grec du VI^e siècle avant notre ère. Ce livre de notes photographiques témoigne de la construction du Gyptis, une réplique du bateau grec cousu (aux virures assemblées par des cordes) et des essais de navigation, depuis la sélection de chênes dans la forêt jusqu'au passage d'un cap sous voile en passant par les portraits des charpentiers. Les images des photographes du centre Camille Julian d'Aix-en-Provence sont belles et informatives.

Chantal Masquelier
Psychologue clinicienne, Paris

Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur www.pourlascience.fr



PRÉSENTEMENT EN CE JOUR

Le mot ancien *hui*, comme le mot latin *hodie* dont il dérivait, signifiait *en ce jour*. Le mot *aujourd'hui* est donc un pléonasme : il signifie quelque chose comme *au jour de ce jour*.

Pourtant, il n'est pas rare d'entendre des gens dire *au jour d'aujourd'hui*, ce qui revient à *au jour du jour de ce jour*. Double pléonasme !

Cette surenchère exprime, je crois, une inquiétude. On ignore tout du futur, souvent menaçant. Le présent n'en protège pas. Il est là, mais n'est déjà plus là. On ne parvient ni à le saisir ni à profiter pleinement de lui. A-t-il même une réalité ? Alors, comme pour le lester et l'empêcher de fuir, on alourdit le mot qui le désigne. Quand le mot signifiant *aujourd'hui* sera devenu si long qu'il faudra plus de vingt-quatre heures pour le prononcer, on ressentira l'heureuse illusion que le temps a suspendu son vol et que demain n'est pas pour demain...



DES ÂNERIES RASSÉRÉNANTES

Les enfants font des pitreries, les adultes s'agacent, les enfants persistent. Ils ont une raison pour cela. En faisant les pitreries, ils explorent les possibilités offertes par leur corps. À coups de genoux et de coudes éraflés, ils se familiarisent avec les limites qu'impose une loi qui ne les lâchera pas de toute leur vie : la gravitation.

Les enfants disent des bêtises, les adultes s'agacent, les enfants persistent. Ils ont une raison pour cela. En disant des bêtises, ils



explorent les possibilités offertes par le langage et par la pensée. Et puis, à force d'être repris pour avoir parlé en public de ce dont il ne faut pas parler en public, ils intériorisent les limites qu'imposent les bienséances en usage dans la société où ils vivent.

L'âge venu, plus question de risquer plaies et bosses en jouant aux équilibristes ou en agitant un corps qu'on est déjà heureux de conserver en bon état. Demeure la tête, pourtant. On peut continuer à prospecter les limites de la pensée, hasarder des idées hardies, plus ou moins contrôlées, et voir ce qu'elles donnent une fois énoncées. Avoir à constater, parfois, qu'on a proféré une bourde est un prix qui mérite d'être payé. L'aventure des intuitions audacieuses est plus riche que la sécurité des propos plan-plan. Tant qu'Alzheimer n'a pas frappé, on peut garder l'espoir de dire encore des âneries. Face au vieillissement, cette perspective est rassérénante.

SOCIOREFUTABILITÉ

Pour être scientifique, une théorie doit être réfutable. Soit. Mais réfutable par qui, pour qui, comment ? Un non-spécialiste ne saurait réfuter la théorie du Big Bang. Donc, pour lui, elle n'est pas scientifique. La seule question à sa portée – et encore... – relève de la psychosociologie : les cosmologistes sont-ils dignes de confiance ? Si, après enquête, il répond « oui », il est fondé à adopter leur conclusion sur le statut du Big Bang sans vérifier la démarche qui y conduit.

Quant à des savoirs moins élaborés, comme la loi des séries ou l'omniprésence du nombre d'or, les scientifiques ont beau les réfuter, beaucoup de gens continuent d'y

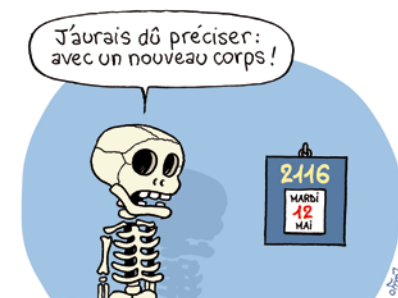
voir l'expression accomplie d'une analyse scientifique du monde.

Invoquer la réfutabilité sans se soucier ni de sociologie ni de psychologie est trop abstrait. Aucune instance n'est arbitre indiscutable, parce qu'aucune ne dispose d'outils non biaisés. Les spécialistes, ayant des formations semblables, risquent de partager comme allant de soi des présupposés en fait mal assurés. En outre, avoir à braver le consensus des collègues, le cas échéant, est périlleux.

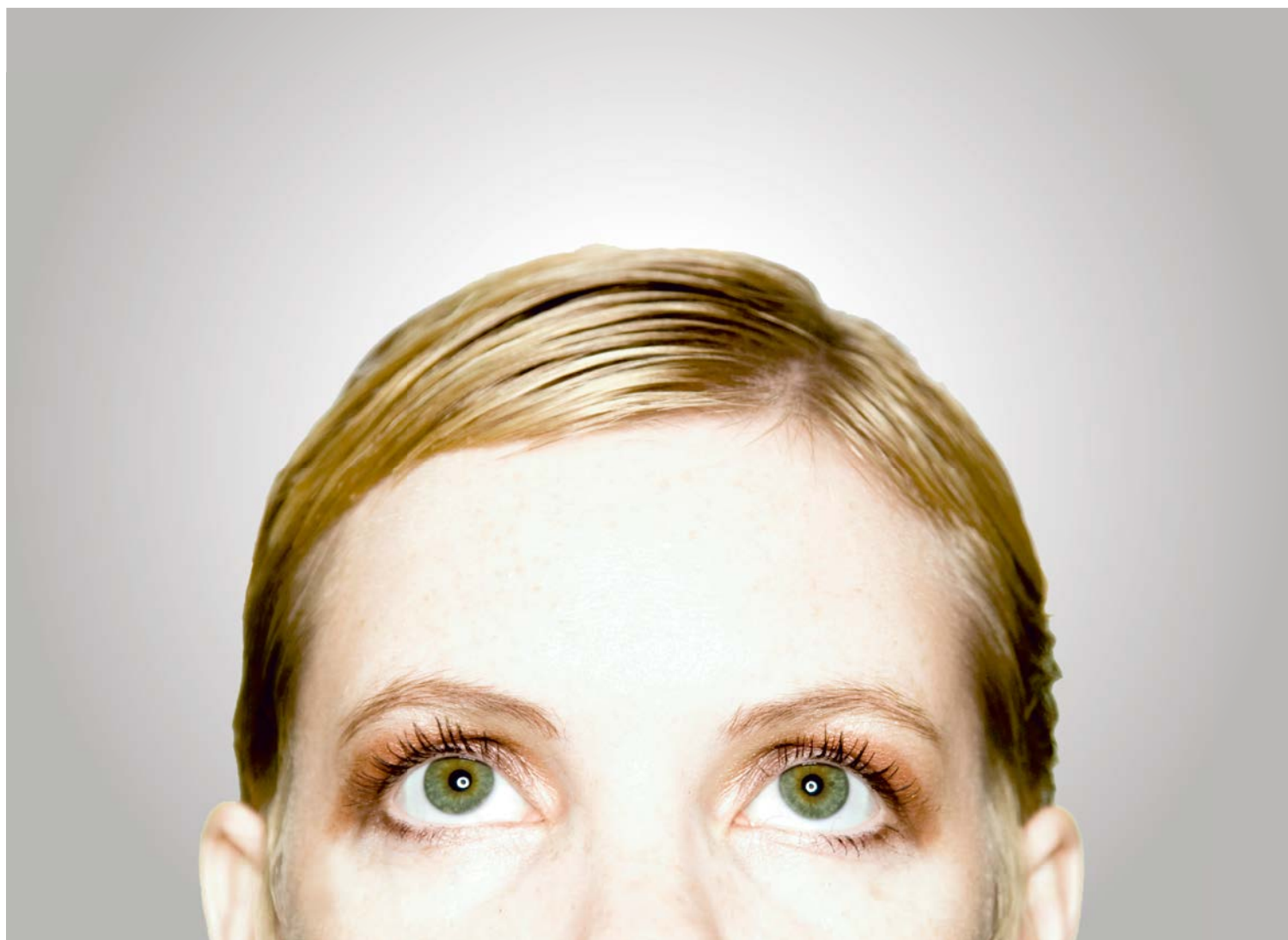
Plutôt que dans l'absolu, la réfutabilité et la scientificité existent relativement à des communautés. La loi des séries est non scientifique aux yeux des scientifiques, et scientifique aux yeux des non-scientifiques !

RESSUSCITER, D'ACCORD, MAIS À QUEL ÂGE ?

Banals sont les vœux du genre : « J'aimerais revenir dans cent ans pour voir comment a tourné telle affaire [la construction de l'Europe, par exemple, ou Internet] ». Mais celui qui en formule un ne précise jamais quel âge il voudrait avoir au moment de son retour sur Terre. Pourtant, son « je » n'est pas



une permanence. S'il ressuscite en étant âgé de huit jours, il ne se souciera ni de l'Europe ni d'Internet. S'il ressuscite en ayant dix-huit ans ou en ayant quatre-vingts, il n'aura pas les mêmes façons de comprendre et d'interpréter ce qu'il verra. Formuler le vœu de revenir sans spécifier à quel âge on souhaite le faire révèle un manque criant d'esprit pratique. ■



AcademiaNet offre un service unique aux instituts de recherche, aux journalistes et aux organisateurs de conférences qui recherchent des femmes d'exception dont l'expérience et les capacités de management complètent les compétences et la culture scientifique.

AcademiaNet, base de données regroupant toutes les femmes scientifiques d'exception, offre:

- :: Le profil des femmes scientifiques les plus qualifiées dans chaque discipline – et distinguées par des organisations de scientifiques ou des associations d'industriels renommées
- :: Des moteurs de recherche adaptés à des requêtes par discipline ou par domaine d'expertise
- :: Des reportages réguliers sur le thème »Women in Science«

Robert Bosch **Stiftung**

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

nature

POUR LA
SCIENCE

Une initiative de la Fondation Robert Bosch en association avec
Spektrum der Wissenschaft et Nature Publishing Group

www.academia-net.org

OPEN INNOVATION

by



COSMETIC VALLEY
FRANCE



**START UP,
SME,
PROJECT
LEADER**

**Submit
your projects
&**

**MAJOR
COSMETIC &
PERFUMERY
COMPANIES**

**Get high qualified
meetings at**

COSMETIC360®
INNOVATIONS & SOLUTIONS > PARIS

Register online before June 30th, 2016

www.cosmetic-360.com

+33 (0)2 37 211 211 - contact@cosmetic-360.com