

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American



AOÛT 2017
N° 478

MATHÉMATIQUES
**LES AVATARS
DE LA SUITE
DE FIBONACCI**

ÉCOLOGIE
**L'ACIDIFICATION
DES OCÉANS
AFFOLE LA FAUNE**

ASTROPHYSIQUE
**TABBY,
L'ÉTOILE
MYSTÉRIEUSE**

**NOUVELLE
FORMULE**

**500 000 ans
avant l'Homme**

**QUI
A TAILLÉ
LES PREMIERS
OUTILS?**

STATA®

release 15

Vos demandes ont été entendues,

The collage illustrates the Stata software interface with several key components:

- Age Earnings Profiles, USA 2002 by Gender and College Degree:** A line graph showing hourly earnings (Y-axis, 0 to 25) versus age (X-axis, 30 to 70) for Males and Females. Two lines represent different college degrees: 'College degree' (higher earnings) and 'No degree' (lower earnings).
- Robust Regression Results Table:**

	Coef.	Std. Err.	z	P> z	[95% Conf. Interval]
pincome	.3326164	.0098437	33.79	0.000	.3133031 .3519096
hsgpa	-.3028844	.0402001	-7.53	0.000	-.2240937 -.3816751
_cons	-.3138166	.1097607	-2.86	0.004	-.0986895 -.5289437
- Log pseudolikelihood = -8177.0884:** A window displaying the log pseudolikelihood value and Wald chi2(2) = 1660.13, Prob > chi2 = 0.0000.
- Predicted Doctor Visits For Two Groups:** A histogram showing the density of predicted doctor visits for two groups. The X-axis is 'Number of visits' (0 to 25) and the Y-axis is 'Density' (0 to 15).
- Stata Main Window:** Shows the command window with the command: `gpa1 gpa2 pincome, select(iaschool = hsgpa pincome i.roommate) endogenous = pincome i.hacomp) vce(robust)`
- Dialog Boxes:** Includes 'Extended interval regression' and 'From: Fit a robust model using the three plots'.

STATISTIQUES • GRAPHIQUES • DATA MANAGEMENT

Ritme est distributeur officiel en France,
Suisse, Belgique et Luxembourg



Ritme - 72, rue des archives - 75003 PARIS
Tél. : +33(0)1 42 46 00 42 - Fax : +33(0)1 42 46 00 33

www.ritme.com

PRESSE ET COMMUNICATION

Susan Mackie
susan.mackie@pourlascience.fr • Tél. 01 55 42 85 05

PUBLICITÉ France

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

ABONNEMENTS

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

Tél.: 03 67 07 98 17

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

Tarifs d'abonnement 1 an (12 numéros)

France métropolitaine: 59 euros - Europe: 71 euros
Reste du monde: 85,25 euros

DIFFUSION

Contact kiosques: À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet
Tél. 04 88 15 12 41

Information/modification de service/réassort:
www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in chief: Mariette DiChristina

President: Dean Sanderson

Executive Vice President: Michael Florek

Toutes demandes d'autorisation de reproduction, 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 adressés par écrit à « Pour la Science S.A.R.L. », 162 rue du Faubourg Saint-Denis, 75010 Paris. © Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ». En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20 rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

Origine du papier: Autriche
Taux de fibres recyclées: 30 %
«Eutrophisation» ou «Impact sur l'eau»: P_{tot} 0,007 kg/tonne



MAURICE MASHAAL
Rédacteur en chef

LE PROPRE DE L'HOMME EST UNE PEAU DE CHAGRIN

Depuis que la science moderne a fait son entrée, il y a à peine quelques siècles, nous avons énormément appris sur le monde qui nous entoure et sur nous-mêmes. Bien que notre ignorance reste tout de même considérable, on peut remarquer qu'au fil des découvertes, l'humain apparaît de moins en moins exceptionnel, au sens qu'on a de plus en plus de difficultés à définir ce qui lui est propre.

Le langage? Pris dans son sens général, ce n'est pas le propre de l'homme, puisque de nombreux animaux communiquent entre eux selon des modalités diverses, que ce soit vocalement ou par un autre moyen. La pensée? Il conviendrait de bien définir ce que cette notion recouvre, mais il est difficile aujourd'hui d'affirmer que des chimpanzés, des perroquets ou des loups ne raisonnent pas, sous une forme ou une autre. Le rire? Plusieurs expériences et témoignages ont montré que les souris ou les chimpanzés, à tout le moins, en sont doués.

Les outils? Là encore, plusieurs animaux s'en servent, et même en fabriquent, à l'exemple des corbeaux calédoniens (*Corvus moneduloides*), qui façonnent des tiges à partir de feuilles de pandanus. Les outils en pierre taillée? On pensait que c'était l'apanage des hommes préhistoriques, membres des diverses espèces du genre *Homo*. Depuis 2015, cette idée a volé en éclats avec la découverte, au Kenya, de pierres taillées il y a 3,3 millions d'années, quelque 500 000 ans avant la naissance du rameau humain. Comme l'explique le dossier que nous lui consacrons (voir pages 26 à 44), cette découverte remet même en cause la vision classique des débuts de l'hominisation. Alors, que reste-t-il du propre de l'homme? Plutôt que de répondre, lançons une autre interrogation: la question du propre de l'homme est-elle vraiment pertinente? ■

S OMMAIRE

N° 478 /
Août 2017

ACTUALITÉS

P. 6

ÉCHOS DES LABOS

- Abeilles et néonicotinoïdes
- Quel avenir pour les moustiques OGM?
- Les sauts indésirables de CRISPR-Cas9
- Musique sur film de savon
- Lumière pour pesée d'étoile
- Les tombes romaines des boulangers
- Superfluidité à température ambiante
- Oui, les dinosaures couvaient
- Vol des oiseaux et forme des œufs

P. 18

LES LIVRES DU MOIS

P. 20

AGENDA

P. 22

HOMO SAPIENS INFORMATIQUES

Qu'est-ce qu'un « bon » appareil photo?

Gilles Dowek

P. 24

CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES

La blouse blanche rend crédule

Gérald Bronner

GRANDS FORMATS



P. 46

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

QUAND LES MACHINES APPRENDENT COMME DES ENFANTS

Alison Gopnik

Si l'intelligence artificielle a connu récemment un grand essor, c'est grâce à des approches ayant des points communs avec l'apprentissage des jeunes enfants – lesquels surpassent encore de loin les machines!



P. 54

ASTROPHYSIQUE

L'ÉTRANGE ÉTOILE DE TABBY

Kimberly Cartier et Jason Wright

Une lointaine étoile brille avec une intensité qui fluctue mystérieusement. De là à supposer qu'une civilisation extraterrestre a entouré l'astre d'immenses capteurs pour exploiter son rayonnement...



P. 62

BIOLOGIE MARINE

POISSONS SOUS ACIDE

Danielle L. Dixson

Un poisson-clown qui se précipite dans la gueule de son prédateur, un requin qui évite son mets préféré... Voilà ce qui risque d'arriver à la vie marine en 2100 si l'océan continue de s'acidifier.



P. 70

BIOPHYSIQUE

DES GÉANTS TROP GRANDS

Roland Lehoucq et J.-Sébastien Steyer

Les œuvres de fiction regorgent d'êtres gigantesques. Pourquoi ne peut-il exister d'animaux aussi grands? Galilée se posait déjà la question.



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

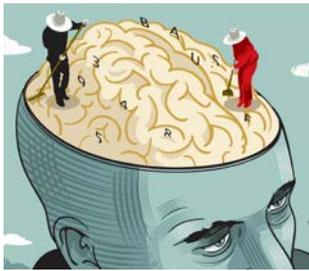


Inscrivez-vous sur
www.pourlascience.fr



En couverture:
© Pour la Science

Les portraits des contributeurs
sont de Seb Jarnot



P.76

HISTOIRE DES SCIENCES

L'EXPÉRIENCE DU CERVEAU COUPÉ EN DEUX

Daniela Ovadia

Que se passe-t-il quand les communications entre les deux hémisphères cérébraux sont rompues? C'est ce qu'a étudié Michael Gazzaniga dans les années 1960, précisant ainsi les fonctions de chaque hémisphère...

À LA
UNE

P.26

PALÉOANTHROPOLOGIE

LES PLUS VIEUX OUTILS DU MONDE



P.28

LES PREMIERS TAILLEURS DE PIERRE N'ÉTAIENT PAS DES HUMAINS

Kate Wong

Homo faber tombe de son piédestal. Si les premiers humains n'ont pas taillé les plus vieux outils de pierre, qui donc a inventé l'industrie lithique?

P.40

« DES TECHNIQUES DE TAILLE SIMPLES, MAIS EXIGEANTES »

Entretien avec Michel Brenet

Comment savons-nous que les très anciens éclats découverts sur le site kényan de Lomekwi sont des outils taillés? Et à quoi servaient-ils? Michel Brenet, spécialiste rompu aux techniques de taille du paléolithique inférieur, nous livre les résultats de ses expérimentations.

RENDEZ-VOUS

P.80

LOGIQUE & CALCUL

LA SUITE DE FIBONACCI... ET SES SUITES

Jean-Paul Delahaye

La suite de Fibonacci est célèbre, au point d'avoir inspiré d'autres constructions: une suite de mots, des fractales, un arbre... Tous ces objets mathématiques constituent des terrains inépuisables de découvertes.

P.86

ART & SCIENCE

L'attaque des féroces escargots

Loïc Mangin

P.88

IDÉES DE PHYSIQUE

Concentrés de lumière

*Jean-Michel Courty
et Édouard Kierlik*

P.92

**CHRONIQUES
DE L'ÉVOLUTION**

L'énigme des 7 vertèbres

Hervé le Guyader



P.96

SCIENCE & GASTRONOMIE

Feuilletages évanescents

Hervé This

P.98

À PICORER

A

ACTUALITÉS

- P.6 Échos des labos
- P.18 Les livres du mois
- P.20 Agenda
- P.22 *Homo sapiens informaticus*
- P.24 Cabinet de curiosités sociologiques

ÉCOLOGIE

UN COCKTAIL DE PESTICIDES GRANDEUR NATURE



Pour identifier dans une ruche les abeilles (ici *Apis mellifera*) qu'ils ont exposées à des néonicotinoïdes, les chercheurs fixent une micropuce sur leur thorax. Ils mesurent ainsi leur durée de vie.

Près des champs cultivés traités, les abeilles ne sortent pas indemnes d'une exposition aux néonicotinoïdes, même si des facteurs extérieurs modulent leurs effets.

Quel est l'impact des néonicotinoïdes sur les abeilles en conditions réelles? Développés dans les années 1990, ces analogues synthétiques de la nicotine, neurotoxiques pour les insectes, sont largement utilisés comme pesticides dans l'agriculture de par le monde. Parfois épanchés sur les plantes en urgence, ils sont le plus souvent appliqués par enrobage des graines: lorsque la plante grandit, l'insecticide s'insère dans ses tissus jusque dans son pollen, son nectar et ses fluides de transpiration. Ces vingt dernières années, de

nombreuses expériences ont montré que, à faible dose, les néonicotinoïdes ont divers effets sur les abeilles. Notamment, ils perturbent leurs aptitudes cognitives. De plus, ils diminuent leurs défenses immunitaires, facilitant leur infection par des virus ou des parasites. Toutefois, la plupart de ces recherches avaient lieu en laboratoire. Que se passe-t-il pour les abeilles vivant près des champs cultivés? Deux études en plein champ, à une échelle inédite et sur des temps longs, apportent quelques réponses.

La principale difficulté, dans la nature, est qu'on ne contrôle pas les conditions. C'est pourquoi Nadejda Tsvetkov, de l'uni-

versité York, à Toronto, au Canada, et ses collègues ont commencé par mener une enquête minutieuse pour déterminer le cocktail de substances non naturelles que les abeilles ingéraient et la durée d'exposition. Ils ont suivi pendant un an, en Ontario et au Québec, 11 ruchers où vivaient 55 colonies d'abeilles «domestiques» *Apis mellifera*: 5 étaient situées près de champs de maïs traités et 6 loin de champs cultivés.

Régulièrement, les scientifiques ont recherché des traces de substances agrochimiques dans le pollen récolté par les abeilles, mais aussi dans les abeilles mortes et dans d'autres à différents stades de vie: 26 substances agrochimiques ont ainsi été répertoriées, dont des fongicides, herbicides, néonicotinoïdes et autres insecticides. Ces substances étaient détectées plus souvent dans les colonies proches des champs et sur des périodes plus longues

atteignant 4 mois, soit la majeure partie de la saison d'activité des abeilles. De plus, les néonicotinoïdes provenaient majoritairement du pollen de fleurs sauvages, signe que les cultures traitées contaminent les plantes sauvages alentour.

Les chercheurs ont ensuite étudié l'effet du néonicotinoïde le plus répandu dans cette étude, la clothianidine. Dans un rucher expérimental éloigné des cultures, ils ont introduit des abeilles dont les larves avaient été exposées pendant trois semaines aux doses mesurées. Leur espérance de vie a été réduite de un quart par rapport à celle de leurs consœurs. Et si on exposait des colonies entières pendant 12 semaines, leurs comportements mettaient en danger la survie des colonies. Par exemple, elles ne remplaçaient plus leur reine quand elle mourait. Enfin, associé à un fongicide fréquent, le boscalid, la clothianidine devenait deux fois plus toxique pour les abeilles... Conclusion: près des cultures de maïs, que les insectes ne butinent pourtant pas (le pollinisateur du maïs est principalement le vent), les abeilles sont en moins bonne santé.

Dans l'autre étude, menée durant un à deux ans au Royaume-Uni, en Hongrie et en Allemagne sur 33 exploitations de colza isolées, Alex Woodcock, du Centre pour l'écologie et l'hydrologie, au Royaume-Uni, et ses collègues ont étudié l'effet de néonicotinoïdes (clothianidine ou thiaméthoxame) sur diverses espèces d'abeilles vivant à proximité, dans des conditions usuelles de culture (pesticides, fertilisants...). Résultat: les effets dépendaient de l'espèce d'abeille et du pays considérés. Par exemple, les ouvrières de l'espèce domestique *Apis mellifera* proches des champs traités à la clothianidine survivaient moins bien à l'hiver en Hongrie, alors qu'aucun effet similaire n'a été observé en Allemagne. Et chez les abeilles sauvages, plus l'exposition aux néonicotinoïdes était élevée, moins *Bombus terrestris* produisait de reines et moins *Osmia bicornis* produisait d'œufs. En d'autres termes, si l'effet des néonicotinoïdes sur les abeilles est indéniable, il n'est pas le même selon les espèces; il est en outre modulé par des facteurs extérieurs, qui parfois augmentent leur nocivité ou réservent de bonnes surprises, comme en Allemagne... mais qui restent à confirmer et à expliquer. ■

MARIE-NEIGE CORDONNIER

N. Tsvetkov *et al.*, B. A. Woodcock *et al.*, J. T. Kerr, *Science*, vol. 356, pp. 1331-1332 et 1393-1397, 2017

Les moustiques OGM ont-ils de l'avenir ?

Le lâcher dans la nature de moustiques génétiquement modifiés pourrait contribuer à réduire les maladies transmises par ces insectes, responsables de un million de décès chaque année. Le 7 juin dernier, le Haut conseil des biotechnologies (HCB) a recommandé d'évaluer de manière approfondie cette approche tout en informant les populations.



Propos recueillis par JEAN-JACQUES PERRIER

FRÉDÉRIC DARRIET
entomologiste médical
à l'IRD de Montpellier
(UMR MIVEGEC)

Comment fonctionnent les techniques de lâchers de moustiques génétiquement modifiés ?

Frédéric Darriet : On lâche des moustiques mâles porteurs d'un gène artificiel, ou transgène, qui s'accouple ensuite avec les femelles sauvages. Le transgène passe alors chez un grand nombre des descendants. Il existe deux grands types de moustiques transgéniques. Dans l'un, le transgène bloque le développement des larves et entraîne leur mort ; c'est ce que propose la société britannique Oxitec avec des souches d'*Aedes aegypti*, le vecteur des virus de la dengue, du chikungunya, de la fièvre jaune et de la fièvre Zika. Dans l'autre approche, le transgène inhibe le cycle de vie du parasite au sein du moustique. Dans les deux cas, on vise à réduire les densités de moustiques vecteurs de pathogènes, mais à chaque fois pour une seule espèce donnée.

Ces approches peuvent-elles constituer une stratégie d'éradication des vecteurs ?

F. D. : Certaines techniques dites de forçage génétique (le gène inséré porte un mécanisme qui favorise sa propagation aux générations suivantes) rendent le transgène très invasif, et visent à l'éradication d'une espèce cible. Mais je n'y crois pas : on peut éradiquer beaucoup d'espèces, mais pas les moustiques ! Quand l'Organisation mondiale de la santé a voulu, dans les années 1950 à 1960, éradiquer le paludisme à grand renfort de DDT, on a juste réussi à sélectionner des moustiques résistants à cet insecticide et à polluer durablement l'eau et les sols. De plus, si l'on élimine un moustique, sa niche écologique risque d'être occupée par une autre espèce, avec des conséquences inconnues. Ainsi, on peut se demander si l'essai à grande échelle mené au Brésil par Oxitec contre *Aedes aegypti* ne va

pas stimuler les populations d'*Aedes albopictus*, le moustique tigre.

Comment faut-il évaluer ces techniques ?

F. D. : Leur efficacité, bien sûr, reste à prouver, notamment sur la propagation des maladies. Surtout, il faudrait étudier de près la « dynamique » du transgène dans les populations naturelles. On ignore ce que devient un gène que l'on intègre dans une population ; rien ne dit qu'il ne passera pas chez une autre espèce en occasionnant des conséquences imprévisibles. La prudence doit être de mise.

Si ces techniques passent la rampe, quel pourrait être leur rôle dans la lutte antivectorielle ?

F. D. : Le HCB souligne à juste titre qu'un seul outil ne règlera pas le problème des maladies à transmission vectorielle. Quand on les utilise bien, les méthodes actuelles de lutte antivectorielle, telles que les moustiquaires imprégnées d'insecticide, limitent les populations de moustiques et les piqûres. Ces méthodes mériteraient d'être plus largement utilisées en Afrique, le continent le plus touché par le paludisme, d'autant qu'elles sont simples à mettre en œuvre et peu coûteuses. La transgénèse de moustiques pourra s'ajouter à cette panoplie si l'on en maîtrise les effets écologiques et les coûts. Elle aurait l'intérêt de diminuer les utilisations d'insecticides, qui entraînent pollutions et phénomènes de résistance. Toutefois, ceux qui en auront l'usage risquent de devenir dépendants d'entreprises privées, comme c'est le cas pour les plantes OGM. Ce n'est d'ailleurs pas un hasard si c'est le Brésil, deuxième producteur mondial de plantes OGM, qui a autorisé les lâchers expérimentaux de moustiques OGM. À l'inverse, en France, les études sur les mâles du moustique tigre rendus stériles par irradiation n'ont à ce jour pas été menées à terme ; à la Réunion, par exemple, après dix ans d'étude, pas un seul moustique stérile n'a encore été lâché dans la nature. ■

Avis du HCB : http://bit.ly/PLS478_HCB

GÉNÉTIQUE

LES SAUTS INDÉSIRABLES DE CRISPR-CAS9

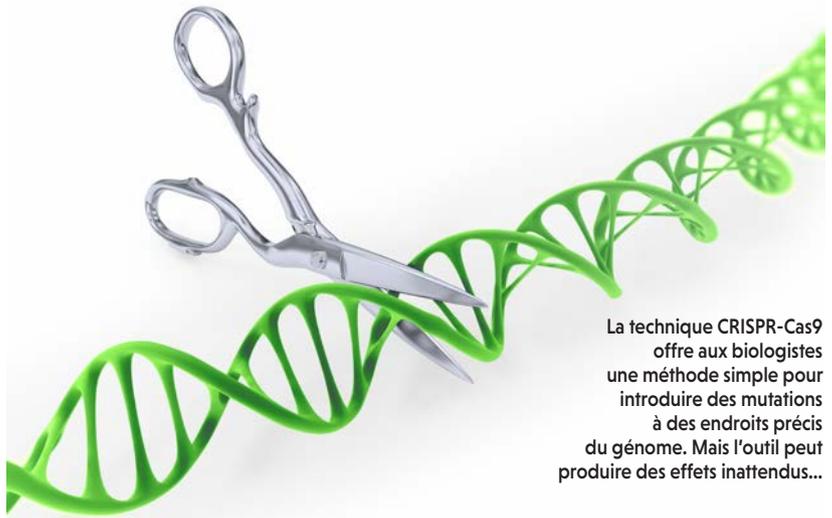
Réputée pour sa précision, cette technique récente de modification du génome perturbe pourtant une étape clé de l'expression des gènes.

CRISPR, une nouvelle marque de céréales? Non, un système de défense immunitaire bactérien qui, depuis quelques années, révolutionne la génétique en offrant un outil simple et précis pour éditer le génome de n'importe quelle cellule. Précis jusqu'à quel point? C'est la question qu'ont récemment soulevée Haiwei Mou, de l'université du Massachusetts, à Worcester, aux États-Unis, et ses collègues en montrant que cette technique entraîne des effets indésirables: des sauts involontaires lorsque la cellule se met à lire et traduire son génome.

Chez les bactéries, CRISPR constitue une sorte de bibliothèque de fragments d'ADN provenant des virus rencontrés. En cas de nouvelle infection virale, les bactéries comparent l'ADN du virus aux fragments de leur bibliothèque. Si une séquence est reconnue, une enzyme, nommée Cas9, coupe l'ADN viral dans cette séquence, ce qui le détruit. Aujourd'hui, nombre de biologistes détournent ce mécanisme pour couper l'ADN des cellules à un endroit ciblé. La technique, nommée CRISPR-Cas9, consiste à associer à l'enzyme Cas9, comme chez les bactéries, un guide – un petit ARN reconnaissant la région du génome à modifier. L'enzyme Cas9 coupe alors l'ADN à l'endroit ciblé, ce qui déclenche sa réparation, soit par recollement des deux bouts séparés, soit par recombinaison avec un fragment d'ADN homologue introduit dans la cellule.

Les biologistes savent que le guide peut reconnaître d'autres séquences ressemblant à sa cible et, en conséquence, développent des techniques pour limiter ce type d'erreur. Mais Haiwei Mou et ses collègues ont pointé une autre difficulté. Habituellement, lorsqu'un gène d'eucaryote est transcrit en ARN messager (l'intermédiaire qui sera traduit en protéine), certains fragments de sa séquence, nommés introns, sont éliminés, tandis que d'autres, les exons, sont conservés. Cet «épissage» est fondamental, car la protéine produite dépend des fragments conservés. Ces chercheurs ont montré que la technique CRISPR-Cas9 produit des épissages non souhaités et pas toujours faciles à détecter.

Ils ont utilisé cette technique pour créer, à partir de cellules cancéreuses de souris, deux



La technique CRISPR-Cas9 offre aux biologistes une méthode simple pour introduire des mutations à des endroits précis du génome. Mais l'outil peut produire des effets inattendus...

35 %

DES MALADIES DUES À UNE MUTATION PONCTUELLE SONT LIÉES À UN ÉPISSAGE DÉFECTUEUX : LA MUTATION PERTURBE LES SAUTS HABITUELLEMENT FAITS LORS DE LA LECTURE DES GÈNES. SOUVENT, LA PERTURBATION CONCERNE UN EXON, C'EST-À-DIRE UNE RÉGION QUI D'ORDINAIRE N'EST PAS SAUTÉE.

lignées où un gène était modifié: dans l'une, un nucléotide (un constituant des gènes) était éliminé d'un exon; dans l'autre, deux nucléotides. Dans les cellules, un gène est lu par triplets de nucléotides: chaque triplet code un acide aminé qui s'ajoute à la protéine en construction. Aussi, en ne supprimant qu'un ou deux nucléotides, on décale la lecture du gène de telle façon que, le plus souvent, la mutation annule son expression. C'était l'effet recherché ici. Toutefois, dans nombre des cellules des deux lignées, au lieu d'annuler l'expression du gène, ces mutations ont entraîné la suppression du seul exon modifié – et la production d'une protéine tronquée.

Mieux, en mutant de même un exon codant une autre protéine, la β -caténine, ils ont montré que non seulement cet exon était fréquemment supprimé, mais la protéine produite était toujours fonctionnelle... et à un mauvais endroit dans la cellule. De plus, des exons voisins étaient aussi touchés. Autrement dit, un gène muté afin qu'il ne soit plus exprimé peut produire une protéine active aux fonctions perturbées. Ces petites mutations introduisent-elles des éléments qui étiquettent l'exon comme devant être omis? Ou au contraire perturbent-elles la signalétique favorisant son épissage? En attendant d'en savoir plus, la recherche des exons «oubliés» va devoir faire partie des contrôles indispensables lors de l'utilisation de CRISPR-Cas9. ■

M.-N. C.

H. Mou et al., *Genome Biology*, vol. 18(1), article 108, 2017

L'ÉVOLUTION, HORS DES ÉCOLES TURQUES

Sous le prétexte fallacieux que les élèves n'ont pas les connaissances nécessaires pour comprendre la théorie de l'évolution, Alpaslan Durmus, le chef du comité sur les programmes scolaires du ministère de l'Éducation turc, a annoncé que la théorie de Darwin serait retirée des manuels scolaires dès la rentrée 2017. Seuls les jeunes entrant à l'université auront l'occasion de découvrir cette théorie. Pour les opposants au régime conservateur du président Erdogan, cette décision est une attaque de plus contre les fondements laïcs de l'État turc instaurés par Moustafa Kemal Atatürk à partir de 1923. Une décision déplorable pour la culture scientifique dans ce pays où le créationnisme trouve un écho favorable...

LA SURFACE DE BÉTELGEUSE SCRUTÉE

L'étoile Bételgeuse est une supergéante rouge que les astronomes étudient de près pour comprendre comment ces astres en fin de vie expulsent de grandes quantités de matière. Eamon O'Gorman, de l'Institut des études avancées de Dublin, et ses collègues ont obtenu une image de la surface de l'étoile grâce au réseau d'antennes *Alma*, au Chili. L'image montre une zone très brillante correspondant à du gaz très chaud dans la basse atmosphère. Ainsi, un mécanisme, probablement de nature magnétique et impliquant de la convection thermique chaufferait localement l'atmosphère, ce qui favoriserait la perte de masse de l'étoile. Ces éléments seront intégrés aux futures simulations 3D de supergéantes.



SECRET DE BEAUTÉ

D'où viennent les extraordinaires faune et flore de la Nouvelle-Calédonie? On a longtemps pensé que, comme Madagascar, son île principale – Grande Terre – s'était séparée du supercontinent Gondwana il y a plus de 80 millions d'années, emportant avec elle, telle une arche de Noé, les nombreuses espèces qui la peuplaient. Toutefois, depuis une dizaine d'années, Philippe Grandcolas, de l'Institut de systématique, évolution, biodiversité, à Paris, et son équipe défendent un autre scénario: au plan biologique, l'île ne serait pas continentale, mais océanique. Elle aurait émergé de l'océan il y a 37 millions d'années et son peuplement serait beaucoup plus récent qu'on ne le pensait.

C'est une petite blatte de la forêt calédonienne qui a mis les chercheurs sur la piste. En établissant l'arbre de parenté moléculaire de cette espèce et de toutes celles récoltées dans l'île et celles voisines, ils ont montré que les blattes avaient peuplé la Nouvelle-Calédonie depuis bien moins de 30 millions d'années. Les biologistes ont alors comparé ces résultats avec les études géologiques portant sur Grande Terre. Or les travaux de ces dernières années ont montré que l'île a une histoire tectonique et sédimentaire complexe, ponctuée de plusieurs longs épisodes de submersion, la



La Nouvelle-Calédonie compte de nombreuses plantes endémiques, dont ces pins. Depuis quand?

dernière émergence remontant à 37 millions d'années.

Forts de cette découverte, Philippe Grandcolas et son équipe ont apporté une nouvelle pierre à leur thèse: ils ont examiné 40 études phylogénétiques qui dataient l'origine des organismes variés de l'île – plantes, insectes, mollusques, lézards – en prenant en compte les îles alentour, comme pour la blatte. Résultat: la plupart sont arrivés sur l'île après sa dernière submersion. Seuls six groupes d'espèces d'insectes seraient plus anciens, ce qui suggère que ces insectes auraient évolué et sauté d'île en île au gré de leurs émergences avant de rejoindre Grande Terre... ■

M.-N. C.

R. Nattier et al., *Scientific Reports*, vol. 7, article 3705, 2017

DISTANCE RECORD POUR L'INTRICATION QUANTIQUE

L'intrication quantique est ce phénomène étonnant par lequel deux particules, par exemple des photons, forment un système lié, même quand elles sont très éloignées. Cet effet a été démontré à maintes reprises, et sur des distances toujours plus grandes. Le record était de 144 kilomètres. Il vient d'être pulvérisé par Juan Yin, de l'université des sciences et des technologies de Hefei, en Chine.

Les expériences précédentes étaient limitées par la dispersion des ondes et la perte de cohérence dans les fibres optiques. Avec de telles méthodes, les physiciens ne pouvaient guère espérer faire mieux. En revanche, avec un satellite... Il s'agit en l'occurrence du satellite *Ques* (*Quantum Experiments at Space Scale*), aussi nommé *Mozi*, placé en orbite en 2016, à

500 kilomètres d'altitude. L'engin est équipé d'un dispositif qui envoie vers la Terre des flux de photons intriqués. Cet état a bel et bien été mesuré au sol, dans des stations distantes de... 1203 kilomètres. L'une était Delingha, dans le nord du plateau tibétain, l'autre à l'observatoire Gaomeigu, à Lijiang. Ici, les photons circulent pour l'essentiel dans le vide, ils ne sont donc pas perturbés par le milieu qu'ils traversent.

Ces résultats sont un premier pas, immense, vers la constitution de réseaux de communication quantique intercontinentaux. L'idée est que l'information circule de façon ultrasécurisée: son interception ne passerait pas inaperçue. ■

LOÏC MANGIN

J. Yin et al., *Science*, vol. 356, pp. 1140-1144, 2017

EN IMAGE

QUAND LA MUSIQUE FAIT DANSER UN FILM DE SAVON

La musique sollicite notre sens de l'audition, mais de nombreux inventeurs ou chercheurs ont imaginé d'autres façons de percevoir les sons. Par exemple, de la poudre dispersée sur une plaque mince se concentre selon des motifs qui dépendent des modes et fréquences de vibration du support sous l'effet du son. Avec ses collègues, Florence Elias, du laboratoire Matière et systèmes complexes à l'université Paris-Diderot, fait vibrer des films de savon. Les couleurs iridescentes du film, liées aux variations de son épaisseur, entament un ballet virevoltant au rythme de la musique (*les huit vignettes ci-contre forment une séquence couvrant une seconde de musique*). Le dispositif est très simple: un haut-parleur diffuse une mélodie à l'extrémité d'un long tube fermé à son autre extrémité par un film de savon. Les vibrations de l'air associées au son se propagent dans le tube et mettent en mouvement le film de savon.

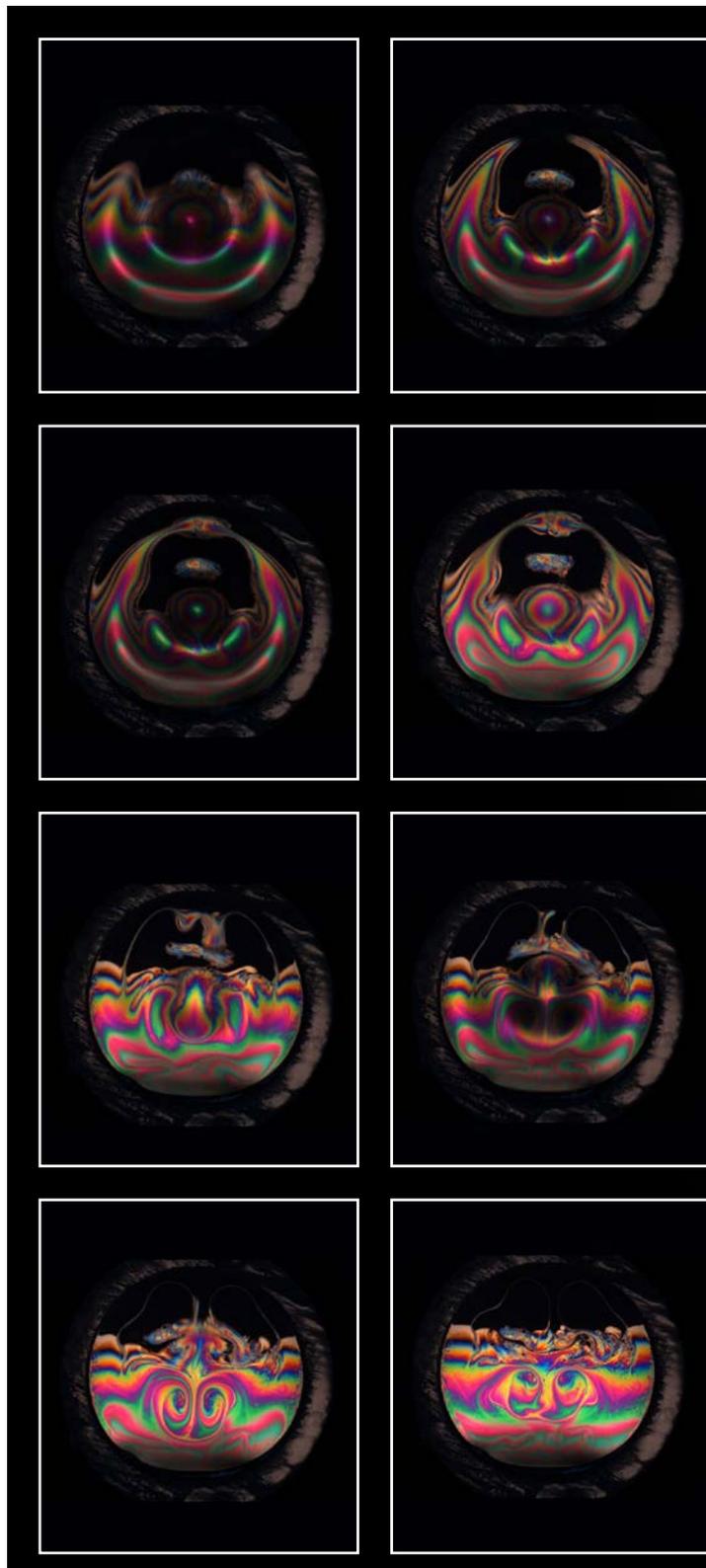
La simplicité du dispositif n'en cache pas moins de riches phénomènes physiques. Même en l'absence des vibrations sonores, le film de savon est un objet complexe, où entrent en jeu sa structure (avec ses interfaces air-liquide et la tension de surface) et les interférences de la lumière à l'origine des couleurs irisées. Quand la musique entre en scène, il faut prendre en compte les ondes capillaires qui se propagent sur le film et modifient sa géométrie et ses motifs colorés.

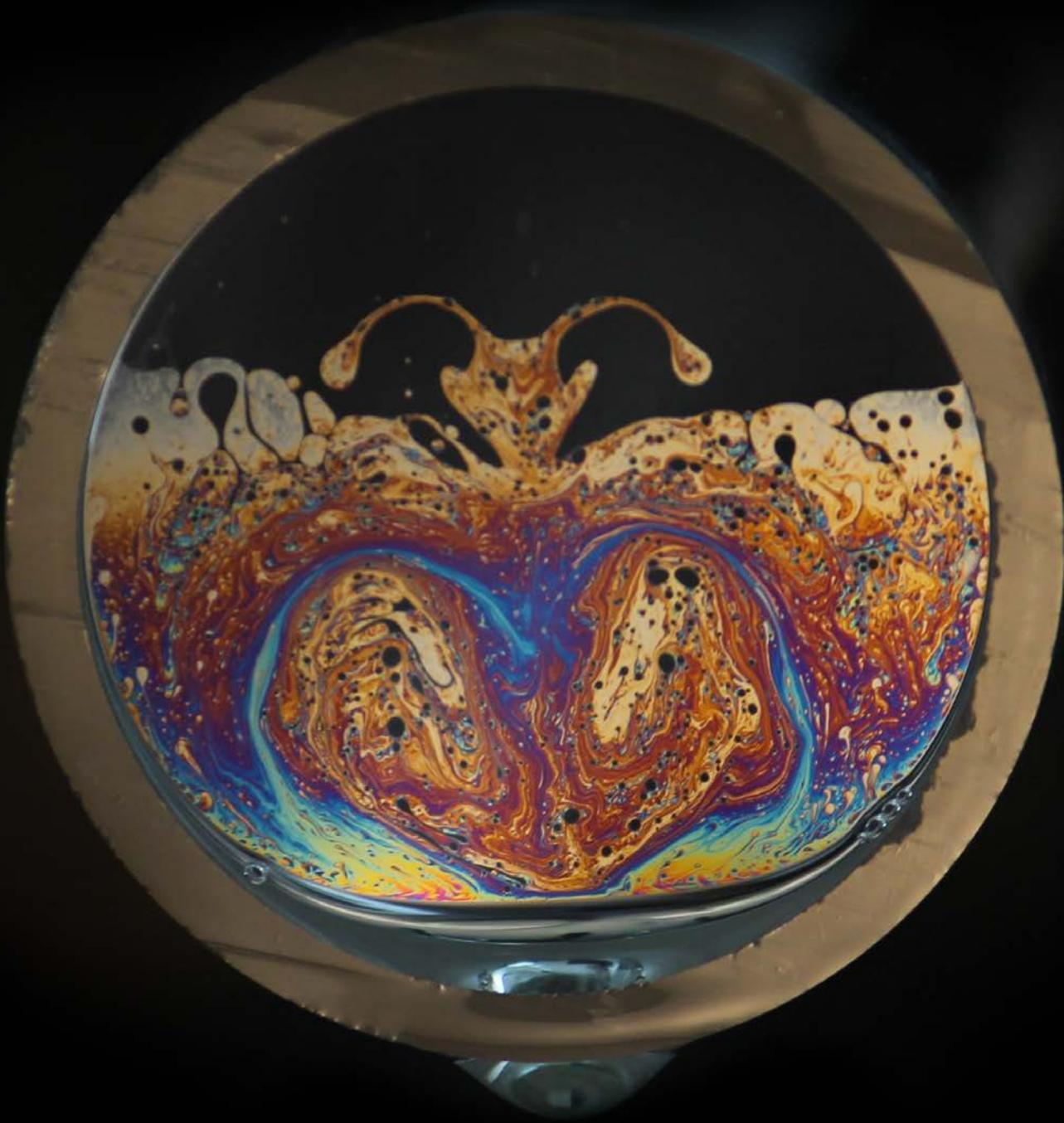
De ce condensé de phénomènes acoustiques, optiques et hydrodynamiques naissent des motifs périodiques, des tourbillons, des bulles (*photo de droite*) que les chercheurs ont étudiés de près sur de nombreux airs, de *Carmen* de Bizet au thème principal du film *Le Bon, la brute et le truand*. Des musiques à savourer avec les oreilles... et les yeux! ■

SEAN BAILLY

C. Gaulon *et al.*, *European Journal of Physics*, vol. 38, article 045804, 2017

Quelques vidéos à découvrir: http://bit.ly/PLS478_Savon





© Laboratoire Matière et systèmes complexes

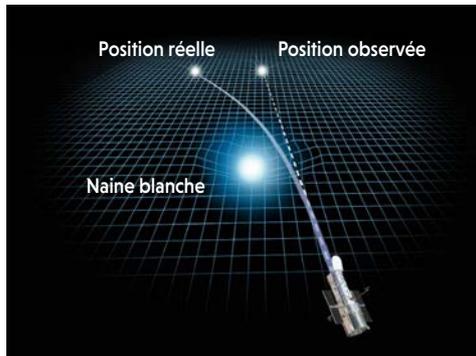
ASTROPHYSIQUE

LUMIÈRE POUR PESÉE D'ÉTOILE

D'après la relativité générale, il est possible d'estimer la masse d'une étoile en mesurant comment elle dévie la lumière d'un autre astre situé en arrière-plan et quasiment dans son alignement. À l'aide du télescope spatial *Hubble*, Kailash Sahu, de l'Institut des sciences du télescope spatial, à Baltimore, et son équipe ont réussi cette prouesse et ont observé ce phénomène au voisinage de la naine blanche Stein 2051 B.

En 1919, l'astronome Arthur Eddington a mesuré cette déviation autour du Soleil lors d'une éclipse. L'angle entre la position réelle de l'étoile d'arrière-plan sur la voûte céleste et celle altérée par l'effet relativiste de déviation n'était que de 1,75 seconde d'arc (environ 0,00049°). En mesurant avec succès cet angle, Eddington a apporté une confirmation éclatante de la théorie de la relativité générale, développée à peine quatre ans plus tôt par Albert Einstein.

Mais avec une étoile autre que le Soleil, la mesure de cette déviation devient très difficile, car l'astre étant plus éloigné, l'angle à mesurer est d'autant plus petit. Einstein lui-même fondait peu d'espoir sur les chances de mesurer d'aussi infimes déviations. Il a néanmoins souligné qu'en considérant un objet plus gros qu'une étoile (par exemple une galaxie ou un



Grâce au télescope spatial *Hubble*, des astronomes ont mesuré la déviation de la lumière autour d'une étoile.

amas de galaxies), la déviation serait importante et permettrait dans certains cas de focaliser la lumière de la source au niveau de l'observateur – un effet dit de lentille gravitationnelle. De la même façon, dans la Voie lactée, on observe des effets de microlentille avec un renforcement de la lumière d'un objet situé derrière une étoile, mais sans qu'on puisse mesurer la déviation.

Kailash Sahu et ses collègues, eux, ont réussi à mesurer une déviation d'environ 0,002 seconde d'arc de la lumière d'une étoile située derrière Stein 2051 B. Ils en ont déduit que la naine blanche pèse environ 0,67 masse solaire. La méthode reste difficile à mettre en œuvre, car elle requiert un alignement d'astres précis et rare. ■

S. B.

K. C. Sahu *et al.*, *Science*, vol. 356, pp. 1046-1050, 2017

ARCHÉOZOOLOGIE

SUR LES TRACES DU CHAT

Vous pensez que votre matou est un descendant du chat sauvage européen *Felis silvestris silvestris*? Détrompez-vous, son ancêtre est *Felis silvestris lybica*, son équivalent moyen-oriental.

Grâce aux informations génétiques issues d'échantillons d'ADN mitochondrial et aux données archéologiques, Thierry Grange, de l'Institut Jacques-Monod, et ses collègues ont suivi la diffusion du chat depuis la première vague de domestication dans la région dite du Croissant fertile, au Néolithique. Les humains auraient alors toléré la présence des chats dans leur habitat, parce qu'ils aidaient à protéger les récoltes en chassant les rongeurs. Puis une seconde vague de domestication a vu le jour en Égypte, au cours de l'Antiquité. D'après Thierry Grange et ses collègues, ce sont les chats de cette région qui se



seraient disséminés en suivant l'homme dans ses échanges commerciaux. On les retrouve d'abord en Grèce, puis dans l'Empire romain et ensuite dans toute l'Europe.

Le processus de domestication n'a pas provoqué de grands bouleversements au sein de l'espèce *Felis silvestris lybica*. Ce qui explique qu'il n'est pas rare d'observer des chats domestiques redevenir sauvages... ■

CLÉMENT DUFRENNE

C. Ottoni *et al.*, *Nature Ecology & Evolution*, vol. 1, article 0139, 2017

EN BREF

CRÂNES SUSPENDUS

Les crânes jouaient un rôle notable dans les religions proche-orientales du Néolithique précéramique (9600 à 7000 avant notre ère). À Göbekli Tepe – un sanctuaire datant de cette époque en Anatolie –, la découverte de sept fragments incisés révèle un nouveau type d'appât d'un crâne : après en avoir percé le sommet, on pratiquait une incision sur le pourtour afin d'y accueillir une cordelette que l'on glissait ensuite à l'intérieur pour la faire ressortir par la calotte percée. On pouvait ainsi pendre le crâne en équilibre dans le sanctuaire. Des traces d'ocre attestent qu'on le décorait aussi.

LE GROENLAND FOND ET L'EAU MONTE

De 1993 à 2014, le niveau moyen des océans s'est élevé à un rythme plus important qu'au cours des décennies précédentes. Et pendant cette période, la tendance s'est accélérée. En 1993, la hausse était de 2,2 millimètres par an ; elle est passée à 3,3 millimètre par an en 2014. Une partie de l'explication vient de la fonte plus importante de la calotte groenlandaise, qui contribuait pour seulement 5 % à la hausse du niveau moyen en 1993, contre 25 % en 2014.

LE CACATOËS NOIR JOUE DE LA BATTERIE !

Cet oiseau (*Probosciger aterrimus*) d'Océanie utilise des bouts de bois pour taper en rythme, ont observé Robert Heinsohn, de l'université nationale australienne, et ses collègues. Les mâles commencent par casser une tige et la tailler à la longueur d'un crayon environ. Ils la tiennent ensuite avec leur patte et tapent à rythme régulier sur l'arbre où ils sont perchés. Ils mêlent à ces percussions des cris pour séduire les femelles. Seuls les cacatoës noirs vivant dans la péninsule du cap York (nord du Queensland australien) présentent ce comportement, qui serait donc culturel.

CE QUE FLAIRE LE PAPILLON

Les insectes utilisent leur odorat pour chercher de la nourriture, repérer des prédateurs ou trouver des partenaires sexuels. Emmanuelle Jacquin-Joly, de l'Inra à Versailles, et ses collègues ont analysé le répertoire de récepteurs olfactifs chez la noctuelle du coton (*Spodoptera littoralis*), dont la chenille cause d'importants dégâts dans les cultures.

Ils ont montré que chez ces papillons, les récepteurs anciens sur le plan évolutif sont sensibles à une large gamme de molécules à structure chimique de type aromatique, fréquentes dans l'environnement de l'insecte. Les récepteurs apparus plus tard au cours de l'évolution sont davantage spécialisés dans la détection des phéromones sexuelles et des terpènes émis par les feuilles dont se nourrissent les chenilles. ■

ÉLODIE BESEVIC

A. de Fouchier et al., *Nature Communications*, vol. 8, article n° 15709, 2017

DU CARBONE DUR ET FLEXIBLE

Dure comme de la pierre et flexible comme du caoutchouc, une nouvelle forme de carbone a été développée par Meng Hu, de l'université Yanshan, en Chine: le carbone vitreux compressé. L'origine de cette combinaison unique de propriétés? La configuration des liaisons entre atomes, qui jouent un rôle essentiel sur les propriétés et la structure du matériau.

Pour synthétiser ce matériau, les chercheurs ont soumis du carbone vitreux à des conditions extrêmes: 250 000 fois la pression atmosphérique et une température supérieure à 2 000 °C. Le matériau a ainsi subi une modification de sa structure et présente à la fois des liaisons de type diamant et des liaisons de type graphite. Cet assemblage lui confère des propriétés mixtes, la dureté du diamant et la flexibilité du graphite. Avec ses caractéristiques, le carbone vitreux compressé pourrait trouver de nombreuses applications industrielles. ■

C. D.

M. Hu et al., *Science Advances*, vol. 3(6), e1603213, 2017

ROME: LES TOMBES DES BOULANGERS RESTAURÉES



Un Christ aux traits romains entouré de quatre personnages est représenté dans un médaillon au plafond de l'une des tombes des boulangers des catacombes de Domitille, à Rome.

Les archéologues de la Commission pontificale pour l'archéologie sacrée ont lutté sept ans pour achever la restauration des 12 kilomètres de galerie des catacombes de Domitille, à Rome. Parmi les 228 cryptes de cette nécropole souterraine qui abrite 26 250 tombes, ils viennent de présenter deux chambres funéraires particulièrement intéressantes. Ces tombes dites des boulangers sont celles de deux hauts personnages du service impérial d'approvisionnement et de distribution du grain à Rome. Maculées de suie, de calcite et de crasse, les fresques ont été soigneusement nettoyées au laser. Elles représentent notamment comment le grain arrivait par bateau au port de Rome et remontait le Tibre sur des chalands avant d'être stocké dans des entrepôts impériaux. Toutefois, elles montrent surtout des thèmes chrétiens, car elles figurent Jésus et ses apôtres à plusieurs reprises, ainsi que des scènes de l'Ancien et du Nouveau testament, notamment Noé et son arche, la multiplication des pains... Pour autant, sont figurés ici et là des faisans, symboles païens typiques de l'au-delà.

Ainsi, les deux cryptes illustrent l'adoption du christianisme par les membres du service impérial de distribution du grain au cours du IV^e siècle de notre ère. Les cultures italiennes, dont la culture latine, constituaient une civilisation du blé, que l'on consommait en général sous la forme de bouillies. Toutefois, comme en attestent les découvertes de Pompéi, la boulangerie (d'origine grecque) existait aussi et il semble qu'au V^e siècle de notre ère, les Romains l'aient massivement adoptée. Or le pain, symbole du corps du Christ, avait une grande importance chez les chrétiens. Le produire ne pouvait donc qu'être prestigieux et profitable. Voilà qui explique sans doute la fortune des deux boulangers enterrés dans les catacombes de Domitille et la richesse des fresques qui ornent les plafonds de leurs tombes. ■

FRANÇOIS SAVATIER

PHYSIQUE

UN SUPERFLUIDE À TEMPÉRATURE AMBIANTE

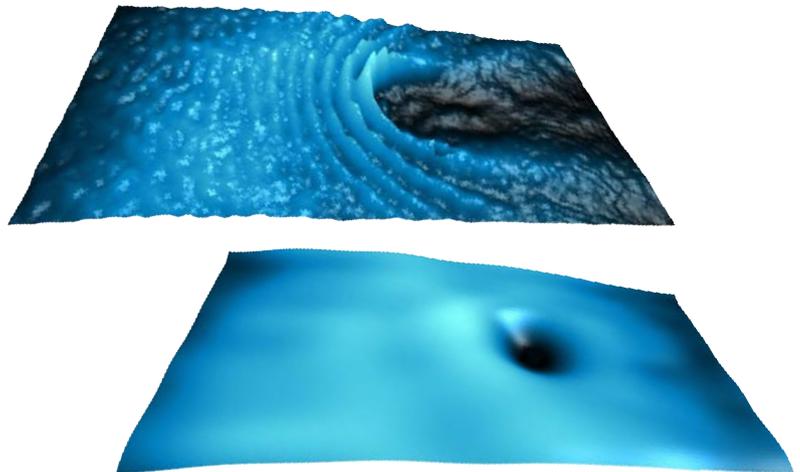
La superfluidité, phénomène où un fluide perd toute viscosité, n'était connue qu'à très basse température. On vient de l'observer à température ambiante – sur un fluide de quasi-particules.

À une température proche du zéro absolu (-273 °C), certains fluides deviennent superfluides: leur viscosité s'annule. On l'a d'abord observé sur l'hélium liquide, qui a alors l'étonnante propriété de remonter le long des parois de son récipient. Stéphane Kéna-Cohen, de l'École polytechnique de Montréal, Daniele Sanvitto, de l'institut de nanotechnologie à Lecce, en Italie, et leurs collègues ont réussi à observer cet effet à température ambiante (20 °C) dans un système particulier.

Pour qu'un fluide s'écoule sans viscosité, une partie au moins de ses particules doivent «se condenser» dans un état quantique unique, nommé condensat de Bose-Einstein. Les particules se comportent alors collectivement comme une onde unique et ne dissipent plus d'énergie en se déplaçant. La supraconductivité (annulation de la résistance électrique) est un phénomène équivalent, où les électrons libres du matériau se groupent en paires.

Superfluidité et supraconductivité émergent à basse température, ce qui requiert de coûteuses et encombrantes installations cryogéniques. On dispose aujourd'hui de matériaux devenant supraconducteurs vers -135 °C (seulement!), mais qu'en est-il des superfluides? Stéphane Kéna-Cohen et ses collègues ont montré qu'il est possible d'obtenir un écoulement sans viscosité à température ambiante avec un fluide de quasi-particules. Il s'agit d'entités abstraites permettant de décrire des comportements collectifs de particules et qui ont des propriétés analogues à celles des particules réelles. Les phonons, associés à la vibration dans un matériau, et les trous, lacunes formées par des électrons absents d'un métal ou d'un semi-conducteur, en sont des exemples.

Ici, les physiciens se sont intéressés aux polaritons excitoniques nés de l'interaction de photons (particules de lumière) avec des excitons, des paires électron-trou. Ces quasi-particules ont une masse très faible qui leur permet d'atteindre des vitesses proches de celle de la lumière. Normalement, en présence d'un obstacle, ces quasi-particules sont réfléchies et diffusées. Les chercheurs ont



découvert que dans certaines conditions, la diffusion est supprimée: l'ensemble des polaritons se propage comme un superfluide et contourne l'obstacle de façon harmonieuse, sans faire de vagues!

Pour obtenir ce résultat, les physiciens ont placé un film très mince de molécules organiques entre deux miroirs hautement réfléchissants. Des photons, émis par un laser, rebondissent entre les miroirs et interagissent fortement avec les molécules organiques, formant ainsi des polaritons qui se déplacent dans le film comme un fluide.

La théorie montre que dans ce dispositif, un écoulement devient superfluide lorsque sa vitesse est inférieure à celle de la propagation du son dans le système. Les chercheurs contrôlent la vitesse du son en jouant sur l'intensité du laser, qui détermine la densité de polaritons (la vitesse du son dépend de la densité et de la force d'interaction entre les quasi-particules). Si la densité est forte, la vitesse du son est élevée et peut dépasser celle de l'écoulement. Avec un faisceau laser intense, les chercheurs ont ainsi obtenu que les polaritons se comportent à température ambiante comme un superfluide. Des résultats qui devraient encourager de nouvelles expériences afin d'étudier l'hydrodynamique quantique à des températures éloignées du zéro absolu. ■

S. B.

G. Lerario et al., *Nature Physics*, en ligne, 5 juin 2017

En régime normal, l'écoulement de polaritons est réfléchi sur un obstacle (*en haut*). Dans le cas superfluide, le fluide de polaritons s'écoule régulièrement autour de l'obstacle, sans aucune perturbation (*en bas*).

LES GÈNES DE L'INSOMNIE

Les recherches montrent que l'insomnie n'est pas qu'une affaire de mauvaises pratiques : elle est aussi dans les gènes. L'équipe de Danielle Posthuma, à l'université libre d'Amsterdam, l'a montré en analysant le génome de 113 000 personnes, interrogées sur leurs difficultés à s'endormir. Les chercheurs ont trouvé sept variants de gènes très fréquents chez les insomniaques et de fortes similarités avec les profils associés à un tempérament anxieux par de précédentes études. Reste à comprendre ce lien intime entre insomnie et anxiété.

ROBOT TRAYEUR DE SCORPIONS

Le venin de scorpion est employé dans la recherche contre le cancer et dans d'autres applications médicales. Pour éviter les risques liés à l'extraction manuelle, Mouad Mkamel et des chercheurs de l'université Hassan II, à Casablanca, viennent d'inventer le VES-4 : cette trayeuse immobilise l'araignée venimeuse sans le blesser, puis lui administre des chocs électriques afin de faire perler son venin au bout du dard, où le précieux liquide est recueilli.

UNE CHARMANTE DÉCOUVERTE AU LHC

Les physiciens de l'expérience LHCb, une des expériences du LHC, au Cern, viennent d'annoncer la découverte d'une nouvelle particule. Celle-ci appartient à la famille des baryons, composés de trois quarks comme le proton et le neutron. Mais cette nouvelle venue, notée Ξ_{cc}^{++} , est le premier baryon à contenir deux quarks dits lourds, de type « charmé ». Sa masse, égale à 3 621 mégaélectronvolts, est presque quatre fois celle du proton. Ce système exotique permettra d'étudier certains aspects de la chromodynamique quantique, la théorie qui décrit l'interaction forte.

LE DINOSAURE COUVAIT BIEN SES OEUFS

Dans les années 1920, en Mongolie, on découvrait les ossements d'un dinosaure au même endroit qu'un nid rempli d'œufs. Cette configuration a été à l'origine de la mauvaise réputation de ce « lézard voleur d'œufs », l'oviraptorosaure. Son image a été réhabilitée dans les années 1990 lorsque des oviraptorosaures fossilisés ont été retrouvés étendus sur des œufs contenant des embryons de cette même espèce. Il est donc probable que ce dinosaure bipède de quelques dizaines de kilogrammes, couvert de plumes et muni d'un bec, couvait sa progéniture. Romain Amiot, du Laboratoire de géologie de Lyon, et son équipe franco-chinoise ont élaboré une nouvelle méthode qui confirme ce comportement.

Les chercheurs ont analysé la composition isotopique de l'oxygène, c'est-à-dire le rapport d'abondance entre les isotopes lourd (^{18}O) et léger (^{16}O) contenus dans les carbonates des coquilles et dans les phosphates des os fossilisés d'embryons d'oviraptorosaures mis au jour dans la province du Jiangxi, en Chine, et vieux de 70 millions d'années. Ils se sont fondés sur le fait que le rapport isotopique $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ dépend de la température à laquelle l'os de

UNE PONTE FOSSILISÉE

Ces œufs d'oviraptorosaure du Crétacé supérieur ont été mis au jour en Chine.



l'embryon se forme. En mesurant ce rapport avec un spectromètre de masse, les chercheurs ont déduit que les œufs étaient maintenus à une température comprise entre 35 et 40 °C. À titre de comparaison, un crocodile enterre ses œufs, qui se développent ainsi à environ 30 °C; une poule couve ses œufs et les garde à 37,5 °C. Les chercheurs ont ainsi confirmé que les oviraptorosaures couvaient effectivement leur progéniture.

Cette technique pourrait être généralisée à d'autres espèces de dinosaures... même s'il est probable que ceux qui pesaient plusieurs tonnes ont adopté une autre méthode! ■

S. B.

R. Amiot et al., *Palaeontology*, en ligne, 28 juin 2017

ASSOCIATION DE MOLÉCULES CONTRE BACTÉRIES

Lors d'une infection, les bactéries pathogènes se fixent sur les cellules cibles grâce à des lectines, des protéines qui se lient aux sucres des membranes cellulaires. Takuya Machida, de l'université de Genève, et ses collègues ont conçu de petites molécules capables de s'autoassembler en présence de ces lectines, et de bloquer à l'aide de sucres leurs l'ensemble des sites de fixation de ces bactéries.

La stratégie qui consiste à inhiber les lectines est à l'étude depuis une dizaine d'années. Ici, les chercheurs ont travaillé sur des lectines de la bactérie *Burkholderia cepacia*, responsable d'infections pulmonaires graves chez des patients immunodéprimés ou atteints de mucoviscidose. Ces lectines présentent six sites de fixation au fucose, le sucre exhibé par la membrane des cellules épithéliales pulmonaires.

Les molécules de l'équipe de Takuya Machida sont constituées d'une unité fucose reliée à deux courts brins d'acide peptidique nucléique (APN), un analogue artificiel, mais plus stable, de l'ADN. Les tests réalisés *in vitro* montrent qu'en présence des lectines, les unités fucoseuses s'insèrent dans les sites de reconnaissance de la bactérie, et chaque brin d'APN s'apparie avec un brin d'une autre unité, tels deux brins d'ADN. Une structure supramoléculaire s'assemble ainsi sur la protéine bactérienne. Cette structure a une affinité 700 fois supérieure avec ces lectines que le fucose seul, ce qui laisse présager une inhibition efficace de l'adhésion des bactéries. ■

MARTIN TIANO

T. Machida et al., *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 56(24), pp. 6762-6766, 2017

ASTROPHYSIQUE

UN ALIGNEMENT GALACTIQUE PRÉCOCE

Les galaxies qui peuplent l'Univers semblent orientées dans tous les sens. Du moins en apparence. Si, au sein des amas galactiques, les galaxies semblent présenter un axe dirigé arbitrairement, ce n'est pas le cas des plus grosses et des plus lumineuses galaxies elliptiques. Celles-ci tendent à avoir leur grand axe aligné avec la distribution de matière de leur voisinage. Cet alignement a été constaté dans des amas proches, donc plutôt « évolués ». Or Michael West, de l'observatoire Lowell, aux États-Unis, et ses collègues l'ont observé à l'aide du télescope spatial *Hubble* dans 65 amas lointains, jusqu'à environ 10 milliards d'années-lumière, ce qui correspond à une période où l'Univers avait seulement un tiers de son âge actuel.

Plusieurs hypothèses ont été proposées pour expliquer cet alignement. Selon l'une d'elles, il résulterait de l'accrétion des petites galaxies par les plus grandes. Les galaxies étant majoritairement réparties selon la direction du filament de matière où se forme l'amas, l'accrétion se produirait de préférence selon cette direction et imprimerait aux grandes galaxies une orientation privilégiée. Un autre scénario



Dans l'amas MACS J0416.1-2403, les galaxies elliptiques semblent alignées avec l'axe de l'amas.

fait intervenir l'attraction gravitationnelle entre les galaxies, qui tendrait à les aligner avec la répartition de matière, c'est-à-dire dans la direction du filament.

En constatant que dans les amas lointains, donc jeunes, les galaxies elliptiques étaient déjà alignées avec leur entourage, Michael West et ses collègues n'apportent pas d'éléments permettant de départager les différents scénarios proposés. Mais leurs observations indiquent que le mécanisme responsable de l'alignement est assez rapide, propriété avec laquelle les théories échafaudées devront être compatibles. ■

É. B.

M. J. West et al., *Nature Astronomy*, vol. 1, article 0157, 2017

BIOLOGIE VÉGÉTALE

L'ÉLIXIR DU VIEUX CHÊNE

Du haut du chêne Napoléon, dans le campus de l'université de Lausanne, 239 ans nous contemplent. Sur place, Philippe Reymond et ses collègues se sont demandé si son génome avait beaucoup changé au fil des ans. Comme les plantes n'ont pas de lignée cellulaire dédiée à la reproduction (les mêmes cellules souches produisent fleurs, racines, branches et feuilles, tout en se renouvelant), on pourrait penser que plus une plante est âgée, plus ses cellules se sont divisées, et donc plus son génome comporte de mutations.

Mais en comparant les génomes de feuilles de vieilles branches basses et d'autres en hauteur, plus jeunes, les biologistes ont constaté que les mutations ponctuelles étaient bien moins nombreuses qu'attendu dans les feuilles hautes, compte tenu du nombre de divisions



Au sommet du chêne Napoléon, les feuilles ne sont pas si différentes de celles des vieilles branches basses...

supplémentaires que leurs cellules avaient dû y subir par rapport à celles des feuilles basses. Le chêne protégerait donc ses cellules souches des mutations. En limitant les divisions de celles destinées à leur renouvellement? Une étude menée en 2016 à l'université de Berne sur l'évolution des cellules souches au sein de deux autres plantes, l'arabette des dames et la tomate, le suggère. ■

M.-N. C.

N. Sankar et al., *Biorxiv*, en ligne, 13 juin 2017

EN BREF

ÉGALITAIRES, MAIS PAS TROP

En général, les gens tendent à condamner les inégalités économiques et sociales. Alors pourquoi celles-ci persistent-elles ? Xinyue Zhou, de l'université Zhejiang, en Chine, et ses collègues ont montré, à l'aide de jeux économiques, que les participants sont prêts à lutter contre les inégalités entre eux, mais pas à aller jusqu'à inverser la hiérarchie. Cette aversion serait un frein majeur contre les initiatives de redistribution des richesses. Chez les enfants, l'injustice des inégalités est perçue dès quatre ans et le refus de renverser l'ordre apparaît deux ans plus tard.

LE PARFUM DES PÉTUNIAS

Les fleurs diffusent-elles activement les molécules organiques volatiles qui attirent les pollinisateurs ? Il semble que oui : Funmilayo Adebisi, de l'université Purdue, aux États-Unis, et ses collègues ont identifié un gène, *PhABCG1*, qui est exprimé sur les pétales des pétunias lorsque les fleurs émettent le plus de parfum. La protéine codée par ce gène agit comme transporteur des molécules volatiles à travers les membranes cellulaires.

L'ACTIVITÉ PHYSIQUE SUIVIE AU TÉLÉPHONE

L'obésité est en partie liée au manque d'activité physique. Pour mieux comprendre les facteurs en jeu, l'équipe de Jure Leskovec, de l'université Stanford, a suivi l'activité physique de près de 700 000 personnes dans 111 pays grâce à leur téléphone portable et son podomètre. Plus que le nombre national moyen de pas par jour, l'inégalité d'activité physique (le fait que des gens marchent beaucoup et d'autres très peu dans un même pays) détermine mieux la prévalence de l'obésité dans le pays. Les chercheurs montrent aussi que l'accessibilité piétonne des villes est cruciale pour l'activité physique.

DES AIMANTS 2D

Depuis que les physiciens ont réussi à produire du graphène, en 2004, de nombreux matériaux composés d'une seule couche atomique ont été étudiés. Ils présentent diverses propriétés, mais le ferromagnétisme (une aimantation permanente) manquait à l'appel. C'est maintenant chose faite grâce à deux équipes, dont celle de Cheng Gong, de l'université de Californie à Berkeley, qui s'est intéressée au triiodure de chrome (CrI_3).

Ce matériau, composé de couches empilées que l'on peut enlever une à une, comme lorsqu'on obtient du graphène à partir du graphite, est ferromagnétique au-dessous de 61 kelvins ($-212\text{ }^\circ\text{C}$). Sous la forme d'une couche monoatomique, le CrI_3 conserve ses propriétés ferromagnétiques jusqu'à 45 kelvins ($-228\text{ }^\circ\text{C}$). Avec deux couches, l'aimantation disparaît, mais réapparaît si l'on rajoute d'autres couches. Les chercheurs comptent maintenant étudier en détail les propriétés de ce matériau. ■

S. B.

Nature, vol. 546, pp. 265-269, 2017 ;
ibid., pp. 270-273

AUX SOURCES DU XÉNON

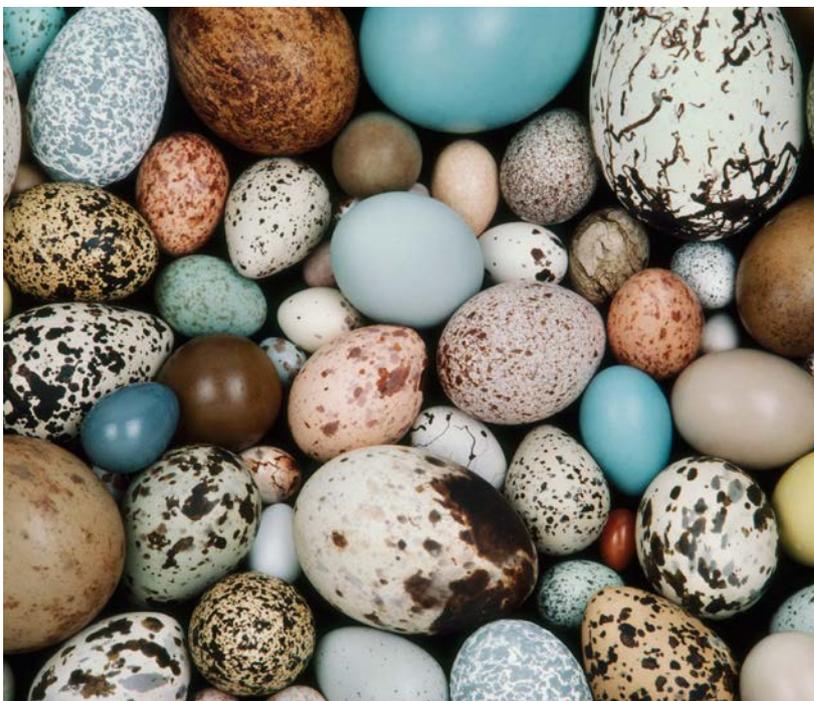
L'origine du xénon présent en d'infimes traces dans l'atmosphère posait question. Sa composition isotopique diffère de celle de sources connues: le vent solaire et les météorites chondritiques. Bernard Marty, de l'université de Lorraine, et ses collègues ont analysé le xénon émis par la comète Tchouri grâce à l'expérience Rosina de la sonde *Rosetta*. Ils ont montré que le xénon cométaire est pauvre en isotopes lourds (^{134}Xe et ^{136}Xe) et riche en isotopes légers (surtout ^{129}Xe). Ils en déduisent qu'environ 20 % du xénon de l'atmosphère terrestre provient des comètes, le reste probablement de météorites chondritiques.

Pour ces chercheurs, leurs résultats renforcent l'idée selon laquelle les comètes ont largement contribué à la constitution de l'atmosphère terrestre. Une théorie pourtant mise à mal fin 2014, lorsque les données de *Rosetta* ont montré que l'eau terrestre n'avait pas la même signature isotopique que celle présente sur Tchouri. Une affaire à suivre... ■

M. T.

B. Marty *et al.*, *Science*, vol. 356, pp. 1069-1072, 2017

FORME DES ŒUFS: LE VOL A SON RÔLE



L'œuf de poule, asymétrique et le plus souvent beige, n'est pas très représentatif de la diversité de formes, tailles et couleurs que l'on constate dans l'ensemble des œufs d'oiseaux.

Sphérique, elliptique ou encore conique, il existe une grande variété d'œufs. Cela fascine les humains depuis longtemps, avec une question récurrente: pourquoi les œufs des oiseaux ont-ils évolué en différentes formes et comment? Afin de résoudre cette énigme, l'équipe de Mary Stoddard, de l'université de Princeton, a adopté une approche interdisciplinaire mêlant mathématiques, physique et biologie. Ces chercheurs ont créé un programme informatique afin de déterminer les caractéristiques d'environ 50 000 œufs représentant 1400 espèces. Ils ont ensuite classé ces objets en fonction de deux paramètres géométriques: l'asymétrie et l'ellipticité.

On sait depuis plusieurs années que la membrane qui tapisse l'intérieur de l'œuf joue un rôle majeur, plus important que la coquille elle-même, dans la forme de l'œuf. Les chercheurs ont constaté que l'épaisseur de la membrane était différente d'un pôle à l'autre de leur classification. Mary Stoddard et ses collègues ont modélisé l'œuf en prenant en compte les propriétés de la membrane et ont ainsi réussi à engendrer l'ensemble des formes d'œufs observées dans la nature. Il restait à comprendre pourquoi il existe une telle diversité de formes.

À partir de leurs données, les chercheurs ont établi des rapprochements entre les caractéristiques des œufs et le mode de vie des oiseaux correspondants. Ils ont ainsi déterminé plusieurs facteurs liés à la forme des œufs: la masse de l'adulte, la localisation et le type de nid, la taille de la couvée et, plus étonnant, l'efficacité du vol. Mary Stoddard et ses collègues ont en effet trouvé que les oiseaux les mieux adaptés au vol, comme les albatros, tendent à avoir des œufs plus asymétriques. Une constatation qui reste à élucider. ■

C. D.

M. C. Stoddard *et al.*, *Science*, vol. 356, pp. 1249-1254, 2017



ARCHÉOLOGIE

AMAZONIE

Stéphen Rostain
Belin, 2017
334 pages, 22 euros

Des «Lilliputien(s) dans la démesure de la forêt» ayant «accompli une œuvre de géant»... Voilà la vision paradoxale des Amérindiens que se forment les Européens découvrant l'Amazonie à la fin du XVI^e siècle. Ces Indiens nus et armés de bâtons partagent leurs principaux traits avec Hercule, dont les douze travaux servent à l'auteur de métaphore pour évoquer leurs colossales réalisations dans un monde hostile. Pour autant, le milieu amazonien n'a rien de grec: ses immenses forêts humides s'opposent aux terres morcelées et arides de l'Hellas; elles constituent en outre un espace sans écrit ni histoire.

Son fil conducteur, l'auteur le suit cependant selon un ordre bouleversé: il commence par les Amazones, ces guerrières mythiques qui symbolisent le monde inconnu – celui des Encyclopédies médiévales –, que découvrent les nouveaux arrivants, éberlués. Pour se limiter à quelques exemples, le nettoyage des écuries d'Augias trouvera son équivalent dans l'aménagement du territoire, avec ces champs surélevés évitant la furie du fleuve tout en bénéficiant de ses apports fertilisants. La peau du lion de Némée, dont se pare le héros, est une parure empruntée au monde sauvage tout comme celles, plus éphémères, des plumes et produits végétaux utilisés lors des rituels.

Sur un ton plein d'humour, l'auteur s'attache à ressusciter des sociétés qui ont su, ici comme à l'autre bout du monde, s'adapter à un milieu difficile, toutes choses désormais bien documentées par l'archéologie, dont on n'imaginait pas qu'elle puisse s'exercer ici. Il montre comment ce milieu a vu naître des cultures spécifiques et originales, et non importées du milieu andin, avec des réseaux commerciaux sous-tendant toute une organisation sociale, parfois déconcertante lorsqu'il s'agit des rituels funéraires ou des pratiques de cannibalisme.

Ainsi se révèle un monde resté trop longtemps méconnu et incompris.

NADINE GUILHOU
UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

PHYSIQUE-CHIMIE

LA VIE SECRÈTE DES ATOMES

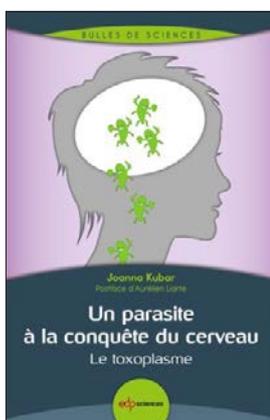
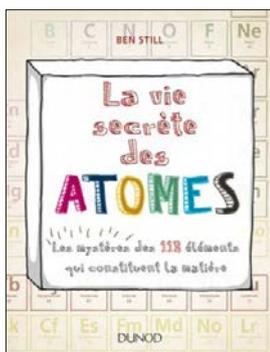
Ben Still
Dunod, 2017
192 pages, 19,90 euros

En 1869, Dmitri Mendeleïev proposait une classification des éléments fondée sur une périodicité de leurs propriétés, mais empirique. Ce n'est qu'à la veille de la Première Guerre mondiale que l'on découvre sa signification profonde. Pour autant, le célèbre tableau périodique des éléments de Mendeleïev reste encore un mystère pour beaucoup de personnes. Comment le lire? Que signifie-t-il?

L'auteur présente les éléments par familles. Chacune d'elles a d'abord droit à une présentation générale, qui met en valeur les propriétés communes. La fiche de chaque membre suit, avec ses traits particuliers. Ce corps de l'ouvrage est précédé d'une explication de la structure atomique et de l'ordre de remplissage des couches électroniques, ainsi que d'une notice de lecture de l'évolution des propriétés des éléments par les lignes et colonnes du tableau. Le tout est agrémenté de dessins qui rendent la lecture divertissante, ce qui devrait plaire aux chimistes en herbe, aux collégiens et lycéens curieux d'en savoir plus.

Seul bémol: il ne faut pas prendre au pied de la lettre certaines informations d'ordre historique, car quelques incohérences sont à relever. Ainsi, le fait de rendre Robert Boyle quasi contemporain de Henry Cavendish (en fait, cent ans les séparent) ou celui d'accorder une particule à Antoine Lavoisier au début du livre pour la retirer plus loin... Prenons avant tout ce livre comme il se propose: agréable à lire ou à feuilleter ou pour découvrir les éléments les moins connus du grand public tels que les transuraniens ou les artificiels fugaces jusqu'au 118^e élément, le tout avec un code de couleurs qui renvoie au tableau périodique. En excellent pédagogue, l'auteur a mis à la disposition du grand public les clés pour comprendre le fameux tableau de Mendeleïev.

DANIELLE FAUQUE / GHDSO, ORSAY



PSYCHOLOGIE

LE CHANT DU SIGNE

Lionel Naccache
Odile Jacob, 2017
168 pages, 22,90 euros

L'auteur prône une attitude riche, prometteuse : « Aménager une liberté à nos pensées les plus loufoques ».

En général, nous interprétons d'emblée et sans erreur les symboles autour de nous – feu rouge, sigle WC, croix verte de pharmacie... Mais il nous arrive de nous tromper. Que se passe-t-il alors dans nos cerveaux ? Pour l'expliquer, l'auteur part d'expériences personnelles. En CM2, il a pris à partie une camarade coupable d'arborer une croix gammée. En fait, elle portait un svastika bouddhique. Il a confondu le svastika avec l'insigne nazi parce que ce sont des images en miroir l'une de l'autre. Or nous avons des neurones capables de reconnaître un objet visuel quel que soit l'angle sous lequel il se présente : nous l'abstrayons de son image sur nos rétines. Cette aptitude à repérer l'identité d'un objet indépendamment de son orientation spatiale explique aussi la difficulté de certains enfants à distinguer le *p* du *q* ou le *b* du *d* lorsqu'ils apprennent à lire.

Autre exemple. Voyant le mot PRIONS sur une pochette de CD à côté du lit d'un patient, l'auteur crut que le patient s'intéressait aux maladies à prions. En fait, l'intérêt était chez l'auteur lui-même, qui participait à une étude à leur sujet, tandis que le CD contenait des prières ! Bien qu'issue d'un processus inconscient, notre première interprétation d'un mot polysémique est contrainte par nos pensées conscientes.

Pourquoi ? Nous avons une mémoire épisodique, qui est la mémoire consciente de notre vécu, et une mémoire sémantique : par exemple, nous savons ce qu'est un kangourou, mais n'avons aucun souvenir de la façon dont nous l'avons appris. Ces deux mémoires reposent sur des systèmes différents. Certaines maladies affectent l'une et pas l'autre. Le souvenir du moment où nous avons été dé trompés après avoir mal interprété un signe appartient à la fois à la mémoire épisodique et à la mémoire sémantique. Cette particularité rare confère à un tel souvenir une résistance à notre tendance à réécrire au fil du temps ce dont nous nous souvenons.

DIDIER NORDON / ESSAYISTE

MÉDECINE-BIOLOGIE

UN PARASITE À LA CONQUÊTE DU CERVEAU : LE TOXOPLASME

Joanna Kubar
EDP Sciences, 2017
250 pages, 18 euros

Le toxoplasme est un explorateur hors du commun. En modifiant le comportement des animaux qu'il infecte – tels les rats, qui se prennent soudain d'un amour incongru pour les chats –, ce minuscule protozoaire parasite passe d'un hôte à l'autre. Une fois dans la place, il s'installe en formant des kystes dans les muscles, les testicules et le cerveau. Il a ainsi envahi une très grande majorité des animaux à sang chaud, humains compris. De fait, les chiffres sont éloquentes. En France, ce sont plus de 200 000 nouvelles personnes qui sont contaminées chaque année. Au total, un adulte sur deux est infecté, de même que 70 % des ovins, 25 % des porcs et 10 % des bovins. Avec des suites pathologiques parfois sévères.

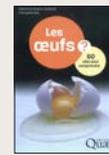
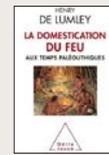
Écrit sous forme de questions-réponses, cet ouvrage allie iconographie pleine d'humour et petites histoires légères et drôles. Joanna Kubar nous entraîne ainsi pas à pas dans les méandres de l'histoire de ce parasite, évoquant tour à tour sa découverte, sa physiologie, son mode de transmission... Elle détaille également les conséquences potentielles de l'infection, dans une longue liste à la Prévert où l'on retrouve des comportements à risque, la schizophrénie, l'épilepsie, la dépression nerveuse et les troubles de la personnalité. Plus étonnant encore, le toxoplasme pourrait influencer la proportion de filles et de garçons ou les traits culturels dominants d'un pays !

Comment agit-il ? Les hypothèses ne manquent pas : localisation privilégiée du parasite dans certaines zones du cerveau impliquées dans la peur et la prise de décision, modification des neurotransmetteurs se traduisant par une concentration accrue de dopamine, perturbations hormonales...

L'ouvrage se termine sur une postface du philosophe Aurélien Liarte. La modulation des comportements individuels et collectifs par le toxoplasme pose en effet une question troublante : où est notre liberté, face à l'étendue des facteurs biologiques et sociaux qui influencent nos actes ?

BERNARD SCHMITT / CERNH, LORIENT

ET AUSSI



LE NOUVEL ÂGE SPATIAL Xavier Pasco

CNRS Éditions, 2017, 192 pages, 20 euros

Spécialiste du secteur spatial américain, l'auteur propose une interprétation de l'évolution des relations de nos sociétés avec leurs activités spatiales. Sous l'impulsion d'une génération de jeunes milliardaires, l'apparition d'un nouveau type d'entreprises spatiales marque le début d'une nouvelle ère, alors que les agences gouvernementales nées durant la guerre froide ont de plus en plus de difficultés à faire financer par les politiques leurs grands programmes. Longtemps une priorité, les programmes spatiaux de l'humanité ont cessé de l'être et doivent être désormais justifiés autrement, ce que ce petit livre efficace met bien en évidence.

LA DOMESTICATION DU FEU Henry de Lumley

Odile Jacob, 2017, 176 pages, 21,90 euros

La terre, l'air, l'eau et... le feu. Cette première analyse de la nature de l'univers physique a probablement une ancienneté paléolithique. Passant en revue les traces de combustion dans les sites paléolithiques, l'éminent préhistorien Henry de Lumley montre que la domestication du feu, commencée peut-être en Afrique, est survenue au sein des populations acheuléennes qui s'aventuraient en Eurasie, mais qu'elle n'aurait été accomplie qu'il y a 400 000 ans seulement. L'usage du feu a joué un grand rôle dans l'homínisation, notamment en modifiant le régime alimentaire et en structurant la vie sociale. De fait, nous vivons encore tous au sein de... foyers.

LES ŒUFS

F. Baron, C. Guérin-Dubiard, F. Nau

Quæ, 2017, 128 pages, 19,50 euros

Mille et un aspects des œufs de poule, cette nourriture excellente et sûre, sont passés en revue. Saviez-vous qu'un œuf qui coule au fond de la casserole a plus de chances d'être frais ? Que les poules ne représentent aucun danger pour les enfants ? Que l'araucana, une poule sud-américaine, pond des œufs bleu-vert ? Que les œufs de poule sont ovales, alors que certains œufs d'oiseaux peuvent être biconiques, elliptiques, sphériques ? Et ainsi de suite. Nature, élevage, industrie, nutrition... : vous saurez tout sur l'œuf.

FLEURANCE (GERS)

DU 5 AU 11 AOÛT
Fleurance et à proximité
www.festival-astronomie.fr

Festival d'astronomie de Fleurance



Cette petite bourgade du Gers qu'est Fleurance accueille chaque année une manifestation autour des sciences, au cours de laquelle le public peut écouter ou rencontrer de nombreux scientifiques de métier, dans des disciplines variées. Comme les précédentes, la 27^e édition de ce festival devenu renommé (il a fait plus de 22 000 entrées en 2016) proposera conférences, ateliers, cours et diverses autres activités à destination de tous les publics – des familles avec jeunes enfants jusqu'aux quasi-spécialistes d'astrophysique.

Et il ne s'agit pas que d'astronomie ou d'astrophysique. Par exemple, le festival s'ouvrira par son 9^e Marathon des sciences, une série de conférences (le samedi 5, de midi à minuit) autour du thème « attraction/répulsion », qui porteront sur des sujets de physique et d'astronomie bien sûr, mais aussi de mathématiques, de biologie, de psychologie et de sociologie.

Bref, un événement convivial et incontournable pour les passionnés de science et les curieux en vacances estivales dans cette belle région occitane. ■

ANNECY

DU 15 MARS AU 5 NOVEMBRE 2017
La Turbine sciences
www.laturbinesciences.fr

L'œil nu



L'anatomie de l'œil humain, la synthèse additive ou soustractive des couleurs, les ombres, la perception des couleurs dans l'obscurité, la perception du relief, la myopie et l'hypermétropie, etc. : des dispositifs interactifs et ludiques font découvrir au jeune public ce qu'est l'œil et comment il fonctionne. ■

PARIS

JUSQU'AU 14 JANVIER 2018
Cité des sciences et de l'industrie
www.cite-sciences.fr

Valérian et Laureline



Consacrée à la BD de science-fiction créée il y a un demi-siècle par Jean-Claude Mézières et Pierre Christin, l'exposition présente une quarantaine de planches originales, avec les points de vue du géographe Alain Musset, de l'astrophysicien Roland Lehoucq et du paléontologue J.-Sébastien Steyer sur les aventures des deux agents spatiotemporels. ■

ET AUSSI

Jusqu'au 27 août
Espace Fondation EDF
Paris
fondation.edf.com

GAME

Le jeu vidéo fait désormais partie des principales industries culturelles de la planète et représente un marché de plusieurs dizaines de milliards d'euros par an. Pour les aficionados, mais aussi pour ceux qui n'y touchent pas, une soixantaine de jeux sont présentés, dont la moitié sont jouables. L'occasion de se remémorer ou découvrir plusieurs jeux célèbres et l'histoire de ce domaine.

Jusqu'au 5 novembre
Musée Champollion
Figeac (Lot)
musee-champollion.fr

LE CHANT DES SIGNES

Papyrus, céramiques, manuscrits, partitions et autres documents ou objets permettent aux visiteurs de cette exposition originale de parcourir l'histoire de la notation musicale et du développement de la musique depuis la préhistoire jusqu'à nos jours.

Jusqu'au 7 janvier 2018
Espace des sciences
Rennes
espace-sciences.org

GRANDE VITESSE

Cette exposition fait partie de l'événement LGV 1H25 organisé à l'occasion du lancement de la ligne de train à grande vitesse reliant Paris à la Bretagne. Sont au programme les trains à grande vitesse dans le monde, les contraintes physiques et mécaniques de la grande vitesse ferroviaire, le choix du tracé, la gestion du trafic, les projets futuristes...

Jusqu'au 4 mars 2018
Musée Mandet - Riom (63)
musees-riom.com

LAME DES CHEVALIERS

Une centaine d'œuvres (armes et armures, mais aussi peintures, sculptures et objets d'art) évoquent le mythe du chevalier, de la fin du Moyen Âge à notre siècle, en mettant l'accent sur l'épée. La présentation suit huit thématiques, notamment les secrets de la forge, le chevalier au féminin et la chevalerie aujourd'hui.

DIJON

JUSQU'AU 7 JANVIER 2018
Jardin des sciences
www.ma-nature.dijon.fr

Sauvages



Quelle place sommes-nous prêts à laisser en France à l'ours brun, au loup, au renard, au lynx et à la loutre? Autour de cette question d'écologie et de société, les visiteurs de l'exposition pourront d'abord se familiariser avec les caractéristiques et les modes de vie de ces cinq espèces de mammifères dont la cohabitation avec les humains ne va pas de soi. Puis sont abordés des sujets qui fâchent: l'histoire de l'attitude de l'homme vis-à-vis de ces animaux, les menaces que font peser sur eux les activités humaines, l'état actuel de leurs populations, les mesures de protection ou non... Sans oublier leur place dans notre culture. ■

PARIS

JUSQU'AU 7 JANVIER 2018
Cité des sciences et de l'industrie
cite-sciences.fr

Terra data



Sous-titrée *Nos vies à l'ère du numérique*, cette exposition a l'originalité d'avoir été conçue avec l'aide du public – un groupe de 70 participants volontaires consulté au printemps 2016. Elle est consacrée au monde des données numériques (*data* en anglais). Qu'est-ce qu'une donnée? Pourquoi parle-t-on de *big data*? Un premier volet de l'exposition répond notamment à ces questions. Un deuxième aborde le traitement des données (algorithmes, indexation de données, moteurs de recherche, visualisation de données, etc.). Une troisième section présente de nombreux champs d'utilisation des données massives, tandis que la dernière porte sur les défis sociaux et humains posés par les technologies numériques. Des thèmes d'une actualité brûlante, dont dépend la société de demain! ■

POITIERS

JUSQU'AU 25 FÉVRIER 2018
Espace Mendès-France
<https://emf.fr>



T'as l'air dans ton assiette

Pourquoi manger? Comment le système digestif fonctionne-t-il? Quels sont les différents types de nutriments et de vitamines? Comment s'y retrouver avec les étiquettes des produits alimentaires? La visite de l'exposition offre des réponses à ces questions qui ont de l'importance pour notre santé, notre vie sociale... et notre plaisir! ■

VILLENEUVE-D'ASCQ

JUSQU'AU 4 MARS 2018
Forum départ. des sciences
<http://bit.ly/2h1S2a5>

Sacrée science!



Avec une trentaine d'expériences proposées dans des domaines variés

(auxquelles s'ajoutent des films et des dispositifs interactifs), les visiteurs sont invités à découvrir, observer, mesurer, vérifier par eux-mêmes. L'objectif est de faire comprendre ce qu'est la science, ce qui la distingue des croyances, les limites auxquelles elle se heurte. ■

SORTIES DE TERRAIN

Les mercredis d'août Wegscheid (Haut-Rhin)
Tél. 06 47 29 16 20

LES MINES D'ARGENT DE WEGSCHEID

Deux heures et demie de promenade dans le secteur minier le plus important de la vallée de la Doller, exploité dès le Moyen Âge et actuellement fouillé par le groupe d'archéologie minière *Les Trolls*.

Jeudi 10 et mercredi 30 août Rosnay (Indre)
www.parc-naturel-brenne.fr
Tél. 02 54 28 12 13

LA CISTUDE EN BRENNÉ

Un petit parcours de moins de 3 heures à la rencontre de la cistude d'Europe, une espèce de tortue d'eau douce fréquente dans les étangs de la Brenne. Sans oublier les oiseaux que l'on peut rencontrer dans les mêmes milieux.

Mercredi 23 août à 10 h La Caunette (Hérault)
www.cebenna.org
Tél. 04 67 97 88 00

PAYSAGES CALCAIRES DU MINERVOIS

Une sortie à la journée dans un site façonné par le travail de l'eau et présentant plusieurs curiosités géologiques (causses, grottes, ponts naturels...) nées d'une histoire mouvementée.

Mercredi 23 août à 13 h Saint-Gildas de Rhuys (56)
Tél. 02 97 53 69 69

À LA DÉCOUVERTE DES ALGUES

Deux heures de balade à marée basse pour faire connaissance avec les algues et pour savoir comment les accommoder, recettes à l'appui (dont une sera réalisée à la fin de la sortie).

Mercredi 30 août à 19 h 30 Villeneuve-lès-Maguelone (Hérault)
Tél. 04 67 13 88 57

DES AILES ET DES ÉTOILES

Une sortie crépusculaire de deux heures dans les salines de Villeneuve-lès-Maguelone, commune située à proximité de Montpellier, pour découvrir la vie nocturne et observer le ciel (si possible étoilé) à l'œil nu.



LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK

QU'EST-CE QU'UN « BON » APPAREIL PHOTO ?

Mobilité, instantanéité, connectivité, universalité...
Les nouvelles technologies confèrent à nos appareils d'autres usages que ceux auxquels on les destinait.



Faire des selfies, l'une des nouvelles façons d'utiliser un appareil photo.

Du milieu du XIX^e jusqu'à la fin du XX^e siècle, les appareils photo, les caméras ou les magnétophones ont produit des images et des sons d'une qualité toujours meilleure. Émerveillé, l'homme du XX^e siècle a successivement découvert le mouvement, la couleur, la stéréophonie... Il a passé des heures à lire des journaux érudits et à comparer, dans des boutiques spécialisées, les coûteux objectifs ou les encombrantes enceintes.

Depuis quelques années, le prix de ces objets ne cesse de décroître, ce qui est un effet habituel de l'informatisation. Mais, de manière plus surprenante, leur qualité décroît aussi, ainsi que l'intérêt que leur porte *Homo sapiens informaticus*. Les boutiques spécialisées se raréfient. Et, la plupart du temps, il utilise un téléphone qui ne coûte que quelques centaines d'euros pour, indifféremment, regarder des photographies et des vidéos ou écouter de la musique. Au-delà d'un certain seuil, améliorer la qualité des images et des sons semble donc présenter un intérêt limité.

Homo sapiens informaticus accorde, en revanche, un intérêt croissant à une autre propriété: la disponibilité de ces objets. Peu semble lui importer, désormais, d'avoir une parfaite restitution des aigus sur la volumineuse chaîne hi-fi de son salon. En revanche, il veut avoir en permanence une chaîne hi-fi dans sa poche, pour écouter de la musique en voiture, dans le

Un bon appareil photo n'est plus un objet qui fait de bonnes photographies

train ou dans la rue. De même, peu semble lui importer l'absence d'aberrations optiques sur les bords d'une photographie, mais il lui est devenu essentiel de pouvoir la regarder juste après l'avoir prise.

Un bon appareil photo n'est donc plus un objet qui fait de bonnes photographies,

mais un appareil que nous avons tous les jours dans la poche et qui développe les photos instantanément.

Cette disponibilité a complètement transformé nos usages. Si nous faisons encore parfois des portraits et des natures mortes, nous photographions aussi, plus prosaïquement, des objets pour les vendre en ligne, des plats que nous mangeons au restaurant, une adresse à retenir, etc.

Cela nous mène à réévaluer certaines transformations qui, au XX^e siècle, nous paraissaient anecdotiques sur le plan technologique et dont nous comprenons, aujourd'hui, le caractère prophétique. L'invention du baladeur à cassette était peut-être aussi importante, malgré sa faible qualité de son, que celle du Dolby stéréo. L'invention de l'appareil photo à développement instantané, le Polaroid, était peut-être aussi importante, malgré ses couleurs criardes, que celle des lentilles asphériques. De manière sans doute plus dérangeante, les photographies de mariage et de vacances étaient peut-être davantage d'avant-garde que celles des peintres du XIX^e siècle, qui voyaient dans la photographie «une servante idéale de la peinture», selon les mots de Baudelaire.

En français, nous distinguons les mots «littérature» et «écriture», car nous écrivons bien d'autres textes que des œuvres littéraires, mais nous n'avons qu'un seul mot pour enregistrer des images: «photographie». Or les nouveaux usages nous apprennent que la photographie n'a pas uniquement pour fin la recherche de la beauté, mais aussi, comme le montraient déjà les photographies de reportage, la représentation du réel à des fins diverses et nombreuses.

Autrement dit, la photographie n'est pas uniquement un «art». À moins de redonner à ce mot son sens original, celui que lui donnent, non les artistes, mais les anthropologues: la production, par les humains, de représentations du réel, quel que soit l'objectif de cette production. ■

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

Dans l'**inter**êt de la science

mathieu
vidard

la tête au carré
14:05-15:00



**france
inter**venez
franceinter.fr



LA CHRONIQUE DE
GÉRALD BRONNER

LA BLOUSE BLANCHE REND CRÉDULE

Par son uniforme ou par son prestige, un scientifique se voit facilement accorder la confiance du public. Même lorsque ses affirmations sortent de son domaine de compétence !



La blouse blanche peut aider à convaincre...

En 1980, on identifia un phénomène connu sous le nom d'«**effet blouse blanche**». Il s'agit de l'augmentation de la fréquence cardiaque et de la pression artérielle des patients en présence d'un médecin. Cet effet produit par le sujet observant sur le sujet observé pose des problèmes de méthode que chacun peut comprendre; il indique, de façon plus générale, l'intimidation ressentie par beaucoup face à une blouse blanche.

Celle-ci confère une autorité sociale à celui qui la porte. Dans certains cas, elle peut même favoriser la diffusion de la crédulité. C'est justement affublé d'une blouse blanche qu'Iben Browning, un consultant et auteur de formation scientifique, fit savoir sur plusieurs plateaux de télévision américains qu'un tremblement de terre surviendrait le 3 décembre 1990 dans la région de New Madrid, dans le centre des  tats-Unis. Cette prophétie aurait dû susciter de la méfiance dans la mesure où les sismologues se gardent généralement de faire des prédictions. Les mises en garde de Browning furent

cependant prises au sérieux et le c t des mesures de prévention fut élevé. Mais rien ne se passa le 3 décembre, et beaucoup se sont ensuite demandé comment la prophétie avait pu être prise au sérieux.

La première raison vient sans doute de cette blouse blanche. Le problème est que Browning n'était pas sismologue, mais zoologiste! C'est en amateur qu'il s'intéressait aux tremblements de terre

La blouse blanche confère une autorité sociale et peut favoriser la diffusion de la crédulité

et il profita all grement de la crédulité inspirée par une autorité usurpée. La seconde raison vient de ce que la région de New Madrid est sismiquement sensible. Attente sociale forte et impossibilité de répondre de façon experte à cette attente: il s'agit là des ingrédients idoines pour

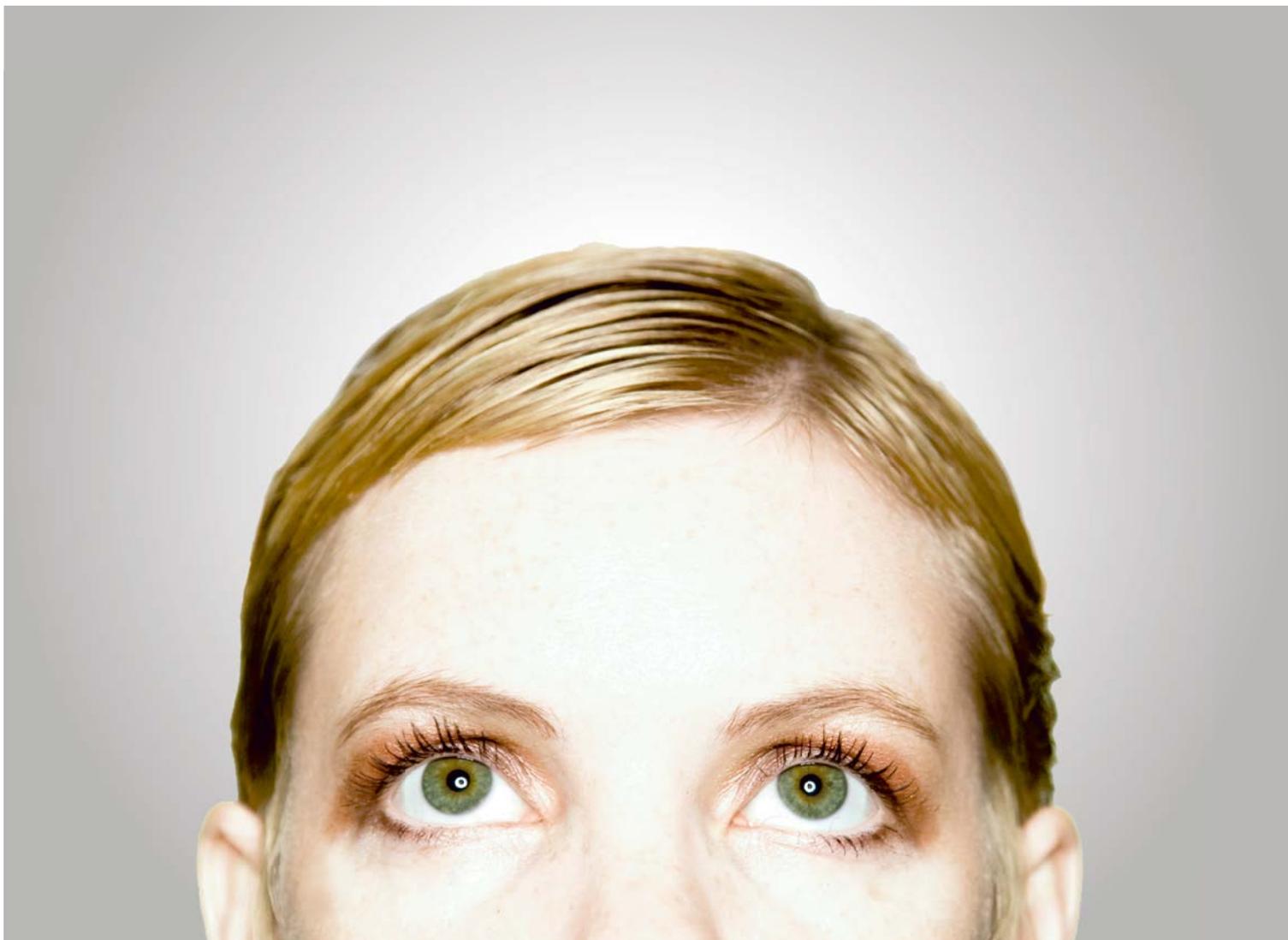
voir apparaître la crédulité vis-à-vis de la blouse blanche. Ce type de situations d'incertitude rend possible le succès du discours pseudoexpert, surtout s'il est tenu par un scientifique qui s'appuie sur une théorie en apparence argumentée. Ainsi, Browning développait son point de vue en supposant une corrélation entre les marées et les séismes. Cette thèse n'était pas originale; elle a été défendue à plusieurs reprises (notamment par Jules Verne) sans être jamais confirmée, mais elle avait l'avantage d'être facilement comprise par le grand public.

La crédulité face à la blouse blanche peut s'exprimer en suivant un spectre qui va de l'erreur honnêtement commise jusqu'à la pure escroquerie intellectuelle. C'est sans doute du premier registre que relèvent les déclarations supposées d'Albert Einstein sur toutes sortes de sujets (mais dont les biographes ne retrouvent pas de traces) – notamment celle, devenue célèbre, qui promet à l'humanité un destin rapidement funeste si les abeilles disparaissaient. Elles tournent pourtant inlassablement sur les réseaux sociaux.

La crédulité vis-à-vis de la blouse blanche dit beaucoup du prestige de l'autorité scientifique, mais aussi de son détournement possible. Il est ainsi difficile de se prononcer sur le statut des déclarations récentes du célèbre physicien Stephen Hawking, qui alerte régulièrement du danger que représenteraient les intelligences artificielles ou extraterrestres, ou encore du fait que l'humanité disparaîtrait dans moins d'un millénaire.

Il y a là l'évidente manifestation d'une forme de crédulité vis-à-vis de la blouse blanche, ces annonces apocalyptiques étant relayées en raison du prestige de son émetteur plutôt que de ses compétences sur ces sujets. Le pire serait peut-être que ces déclarations ne soient pas de Stephen Hawking lui-même. Qui sait s'il ne se trouve autour de cet homme, qui est mur  dans le silence de la maladie de Charcot, quelques publicitaires ventriloques voulant surfer sur le prestige d'un scientifique devenu comme une marque? ■

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



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

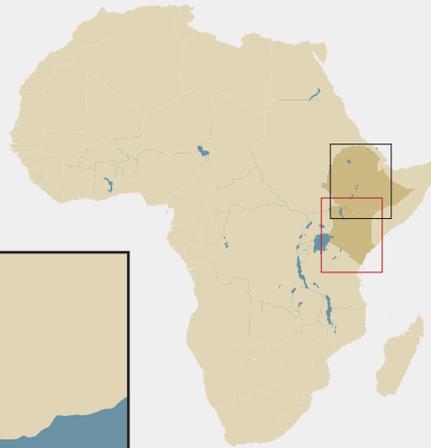
nature

POUR LA
SCIENCE

Une initiative de la Fondation Robert Bosch en association avec
Spektrum der Wissenschaft et Nature Publishing Group

www.academia-net.org

Les PLUS VIEUX OUTILS



- Singes
- Ardipithèques
- Australopithèques
- Humains
- Industrie lithique



Ardipithecus ramidus
6 millions d'années



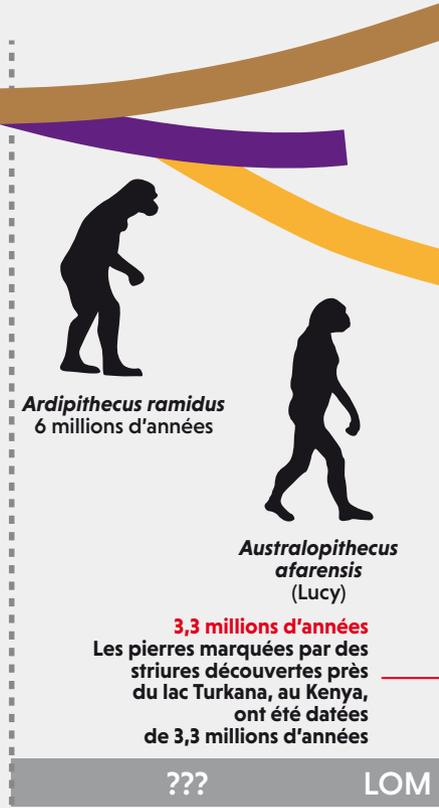
Australopithecus afarensis
(Lucy)

3,3 millions d'années
Les pierres marquées par des striures découvertes près du lac Turkana, au Kenya, ont été datées de 3,3 millions d'années

LES PLUS ANCIENS SITES À OUTILS DE PIERRE

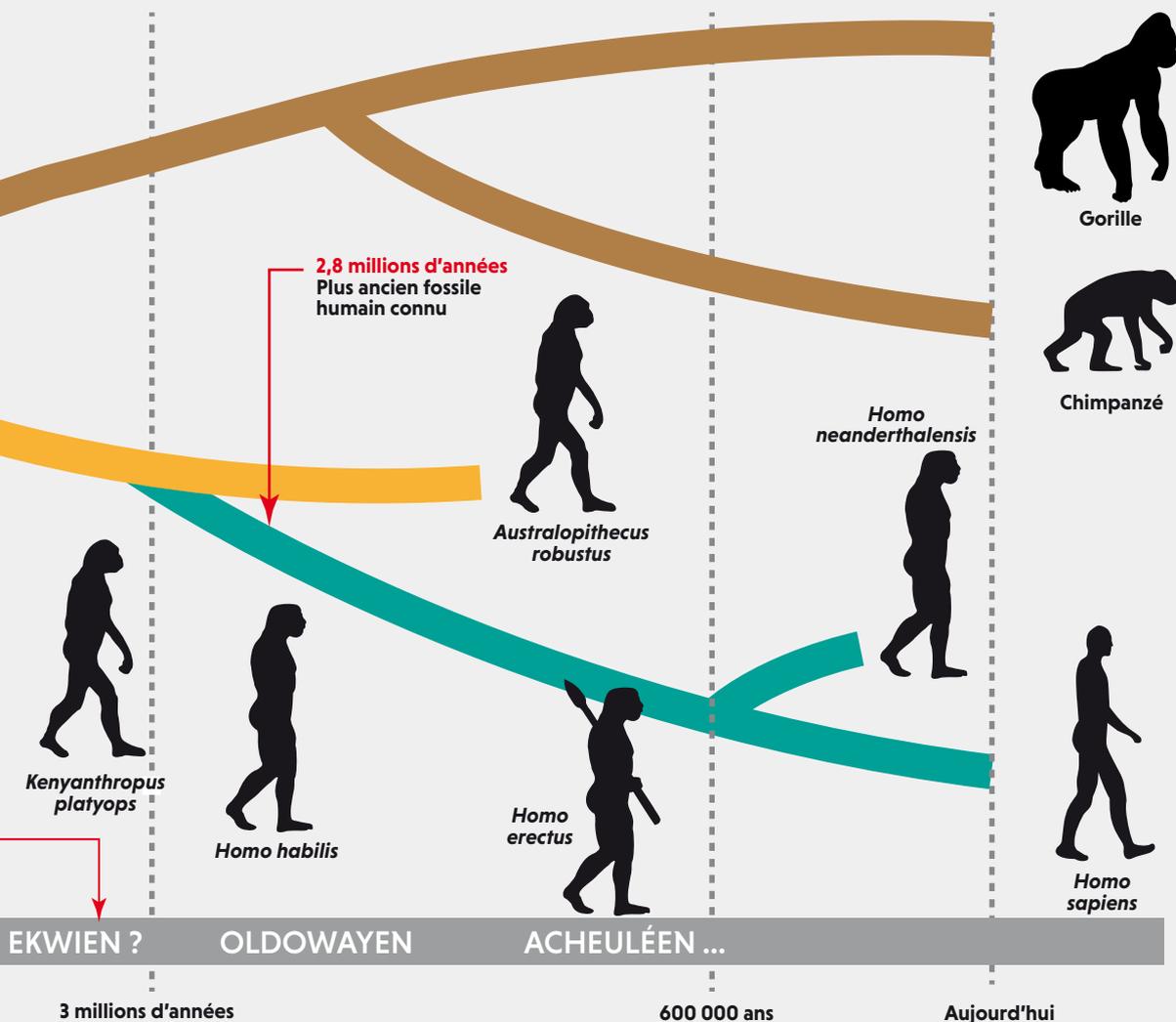
Le site de Lomekwi 3 se trouve à l'ouest du lac Turkana, au Kenya, donc dans la vallée du rift africain. Ses outils taillés précèdent d'environ un million d'années ceux du site voisin de Lokalalei et de 700 000 ans ceux de Gona, en Éthiopie. Non loin de Gona, Dikika est un site fossilifère où ont été découverts deux os vieux de 3,4 millions d'années portant des traces de découpe.

7 millions d'années



du monde

À Lomekwi, au Kenya, l'équipe de Sonia Harmand a découvert des outils façonnés il y a 3,3 millions d'années. Ils prouvent que des hominidés ont taillé la pierre un demi-million d'années avant l'apparition du genre *Homo*. Notre enquête auprès des chercheurs révèle ce qu'ils ont déjà compris sur cette première culture technique.



L'ESSENTIEL

> La vulgate anthropologique voulait que les outils de pierre taillée soient apparus avec le genre *Homo* à la faveur d'une adaptation à un changement climatique.

> S'était alors établie, pensait-on, une boucle amplificatrice dans les interactions main-cerveau ; boucle qui avait

conduit au gros cerveau humain et aux prouesses technologiques qu'il avait rendues possibles.

> La découverte d'éclats tranchants débités il y a 3,3 millions d'années à l'ouest du lac Turkana, au Kenya, bouleverse cette vision traditionnelle.

> Ils prouvent qu'au moins une tradition de taille de la pierre a préexisté au genre *Homo*, donc à l'humanité. Une espèce australopithèque encore partiellement arboricole pourrait en être l'auteur.

> On a compris comment ces outils ont été produits. Leurs usages restent à élucider.

L'AUTEURE



KATE WONG
éditrice et cheffe de rubrique
au magazine
Scientific American

Les premiers tailleurs de pierre n'étaient pas des humains

HOMO FABER TOMBE DE SON PIÉDESTAL. SI LES PREMIERS HUMAINS N'ONT PAS TAILLÉ LES PLUS VIEUX OUTILS DE PIERRE, QUI DONC A INVENTÉ L'INDUSTRIE LITHIQUE ?

Le site kényan de Lomekwi 3 a livré les plus vieux outils du monde. Ils sont plus vieux que l'humanité...



La rive occidentale du lac Turkana au Kenya a fort peu à offrir à ses habitants. L'eau potable y est rarissime et, hors les scorpions et les serpents, les chasseurs ont tué depuis longtemps la plupart des animaux sauvages. Les Turkanas n'ont d'autres ressources que le pastoralisme: ils poussent devant eux des troupeaux de chèvres, de moutons, de bovins, d'ânes et de dromadaires dans la campagne brûlante. Oui, la vie est dure chez eux, très dure, mais cela n'a pas toujours été le cas: il y a des millions d'années, ce même coin de terre regorgeait d'eau; il constituait un habitat luxuriant pour de très nombreux animaux et pour de lointains ancêtres de l'humanité installés dans ce paradis terrestre.

Sonia Harmand est venue explorer ces terres aujourd'hui arides à la recherche d'éventuels outils de pierre laissés par ces ancêtres. Cette chargée de recherche au CNRS au regard intense et à la présence imposante est aussi professeure associée d'anthropologie à l'université de Stony Brook à New York. Par un jour brumeux de juillet, la voici en train de scruter une sorte de caillou posé sur une petite table de bois pliante. De la taille d'un ongle, brun-gris, le bout de roche ne présente aucun intérêt pour le non-initié. Pourtant, il s'agit exactement de ce qu'elle est venue chercher.

UN ÉPINEUX ARBRE DE NOËL

Les membres de son équipe – une quinzaine de Kényans, de Français, d'Anglais ou encore d'Américains – attaquent au marteau et au burin le sédiment se trouvant au pied d'une petite colline. Ils recherchent toute pierre modifiée, tout éclat pouvant résulter d'une activité de taille. En haut de la colline, leurs bouteilles d'eau pendent comme des décorations de Noël aux branches épineuses d'un acacia; la brise du matin est censée les rafraîchir un peu avant que la chaleur ne monte. De fait, dans l'après-midi, la température atteindra 40 °C et le carré de fouille, brûlé par le soleil et privé du moindre souffle de vent, méritera bien son surnom: le four!

En 2015, Sonia Harmand et son mari Jason Lewis, paléanthropologue à l'université de Stony Brook, ont publié la découverte d'une industrie lithique vieille de 3,3 millions d'années sur ce site, nommé Lomekwi 3. Il s'agit des plus vieux outils de pierre taillée jamais découverts. Ils sont tellement vieux qu'ils remettent en cause l'idée, pourtant bien ancrée, que l'évolution du genre *Homo* serait liée à l'outil. À Lomekwi, les chercheurs voudraient bien savoir qui a créé ces outils et pour quel usage, mais ils ont une tâche plus urgente: découvrir davantage de preuves de leur grand âge.

À cet égard, le fragment qu'examinait Sonia Harmand est un indice précieux. Petit et léger,

ce débris de taille est pourtant resté en place dans sa strate, ce qui implique que celle-ci n'a jamais été perturbée par le ruissellement au cours des millions d'années. Et donc que les outils de Lomekwi 3 proviennent bien de cette couche, extrêmement ancienne, et non pas d'un sédiment plus jeune. Alors, maintenant que les fouilleurs ont bien identifié la strate contenant les outils, il leur faut y aller prudemment: *Polé polé*, leur recommande Sonia Harmand en swahili: «Doucement!»

LES OUTILS DE LOMEKWI

Les paléanthropologues ont longtemps considéré la production d'outils comme un trait – sinon le trait – définissant le genre humain et, partant, comme la clé de son succès évolutif. Nombre d'animaux emploient des outils, mais les humains sont les seuls capables de façonner des matériaux aussi durs que de la roche. Quand ils créent, ils s'appuient en outre sur les inventions du passé, ce qui, avec le temps, fait croître l'utilité et la complexité de leurs innovations. «Il semble que nous soyons la seule lignée animale complètement technologique, pointe Michael Haslam de l'université d'Oxford. Nos objets techniques ne sont pas des béquilles, mais des extensions de notre corps.»

Dans la théorie classique, notre technodépendance remonterait à un changement du climat qui, entre deux et trois millions d'années, a transformé les forêts en savanes. Cette évolution climatique aurait forcé les hominines, nos lointains aïeux de l'époque, à s'adapter à la disparition de leurs sources forestières de nourriture. L'une des lignées hominines, celle des australopithèques robustes, le fit en développant les larges molaires et les puissantes mâchoires nécessaires pour mastiquer les végétaux coriaces des savanes.

Une autre, celle d'*Homo*, dotée d'un gros cerveau, aurait inventé les outils en pierre taillée, ce qui lui aurait donné accès à davantage de formes de nourriture, et notamment à la chair des herbivores mangeurs de ces nouvelles plantes. Cette lignée d'hominines, une fois en mesure d'exploiter le trésor calorique représenté par la viande, a pu assumer le coût énergétique d'un encore plus grand cerveau, qui lui aurait permis d'inventer de meilleurs outils, et donc de se procurer davantage de calories, et ainsi de suite. Cette boucle amplificatrice aurait augmenté le volume de notre cerveau et notre capacité d'innovation. Il y a un million d'années environ, les australopithèques robustes disparurent, tandis qu'*Homo* était déjà lancé dans sa conquête de la planète.

L'existence des outils de Lomekwi balaie ces anciennes conceptions. Trop anciens pour qu'*Homo* ait pu les fabriquer, ils précèdent aussi le grand changement climatique censé avoir orienté nos ancêtres vers l'innovation. En l'absence de traces de découpe ou d'autres

Les fouilleurs de Lomekwi 3 à la recherche d'outils pendant la campagne de l'été 2016 (à droite). Afin de ne pas perdre même le plus petit éclat de taille ou indice intéressant, ils tamisent la terre retirée de l'emprise de la fouille (ci-dessous).





signes d'activités de boucherie, il n'est pas du tout certain qu'ils aient servi à découper de la chair animale. En outre, une durée tellement grande les sépare des premiers artefacts connus après eux qu'il est impossible de les connecter avec le reste des activités techniques humaines. Dès lors, il se pourrait que l'invention de l'outil n'ait pas constitué la grande rupture que l'on avait imaginée.

Depuis la découverte de Lomekwi 3, les paléanthropologues s'acharnent à comprendre quand et comment nos ancêtres ont acquis les traits physiques et cognitifs nécessaires pour concevoir et réaliser des outils taillés, puis transmettre les savoir-faire acquis à la génération suivante. Si plusieurs lignées ont taillé la pierre, ils devront revoir une grande partie de ce qu'ils pensaient sur l'origine de la technologie et sur son influence dans l'évolution de la lignée humaine.

UNE LONGUE SAGA

L'aube point dans la brousse et le ciel s'illumine; petit à petit, les oiseaux se mettent à chanter tandis que, sur la rive de la rivière asséchée où on l'a installé, le camp s'anime. Il est 6 heures 30. Un à un, les fouilleurs sortent de leurs tentes et rejoignent par des sentiers bordés de pierres et couverts de gravier – utile précaution contre les serpents et scorpions – la table de fortune où est servi le petit déjeuner.

Une heure plus tard, il est déjà temps de s'entasser dans les véhicules tout-terrain en partance pour la fouille.

Comme un véhicule manque, il n'y a pas de sièges pour tout le monde dans les deux qui restent. L'archéologue Hélène Roche décide alors de rester au camp. Cette directrice de recherche émérite au CNRS est une spécialiste des premiers outils. Elle a dirigé la recherche archéologique dans le Turkana occidental pendant 17 ans, avant de passer le flambeau à Sonia Harmand et à Jason Lewis en 2011. La couleur de sa courte chevelure s'accorde aux tons sable de ses vêtements. Sa voix est basse et claire. Hélène Roche est là aujourd'hui, car elle est venue voir comment se déroulait la campagne. Je décide de rester au camp pour la journée et d'en profiter pour l'interroger sur l'histoire de la recherche dans cette région.

«Quand je me suis lancée dans l'archéologie, nous en étions à peine accoutumés à l'existence d'outils de 1,8 million d'années à Olduvai», se remémore-t-elle. En 1964, en effet, le paléanthropologue kényan Louis Leakey annonçait avoir découvert des fossiles d'apparence humaine en association avec des objets façonnés à la main – les plus anciens à l'époque. Trouvés dans la gorge d'Olduvai en Tanzanie, ces artefacts ont défini un style de taille: l'Oldowayan. Leakey attribua les fossiles à une nouvelle espèce humaine, qu'il nomma l'«homme >

► habile» ou *Homo habilis* en latin, installant ainsi l'idée que la fabrication d'outils marque l'émergence de la lignée humaine.

Mais, rapidement, on découvrit des indices de l'existence d'outils préhumains. Dans les années 1970, alors qu'elle préparait sa thèse, Hélène Roche mit au jour des outils oldowayens anciens sur le site de Gona, en Éthiopie. Quand Sileshi Semaw, un archéologue qui travaille aujourd'hui au Centre national de recherche sur l'évolution humaine à Burgos, en Espagne, finit par les étudier avec son équipe, il leur accorda l'âge de 2,6 millions d'années. Aucun fossile humain ne leur étant associé, les chercheurs proposèrent qu'une espèce australopithèque à petit cerveau trouvée sur un site voisin – *Australopithecus garhi* – en était l'auteur. Une proposition qui ne convainquit pas grand monde... *Homo* resta donc le producteur d'outil présumé, même si, à l'époque, l'âge du plus ancien fossile indéniablement *Homo* n'excédait pas 2,4 millions d'années... (depuis, une découverte récente a étendu le registre fossile humain jusqu'à 2,8 millions d'années).

JUSQU'À 70 ÉCLATS DÉBITÉS D'UNE SEULE PIERRE

Toutefois, aussi vieux qu'aient été les artefacts de Gona, ils étaient taillés avec trop d'adresse pour représenter la première tentative humaine de façonnage d'outils. Il en allait de même pour les autres outils anciens que l'on découvrait petit à petit, notamment au Turkana occidental. Dans les années 1990, Hélène Roche découvrit ainsi des outils oldowayens de 2,3 millions d'années d'âge sur un site distant de seulement huit kilomètres de Lomekwi: Lokalalei 2C. Elle réalisa que ce site avait figé toute la séquence de la chaîne opératoire des tailleurs. En reconstruisant, comme un puzzle en trois dimensions, certains des nucléus de Lokalalei à partir des éclats qui en avaient été détachés, son équipe put montrer qu'un tailleur pouvait tirer jusqu'à 70 éclats d'un même nucléus! Cette impressionnante performance implique la connaissance de la forme de pierre la mieux adaptée au débitage (plate en haut et convexe sur les côtés) et une planification afin de conserver cette forme pendant la taille. «Avant de l'avoir vécu, on ne peut imaginer le sentiment que donne le fait de rassembler des éclats pour reconstituer ce qu'a fait le tailleur et comment il l'a fait, bref d'entrer dans sa tête», dit-elle.

La sophistication des outils de Gona, de Lokalalei et d'autres endroits rendait évident que la taille oldowayenne ne pouvait être sortie parfaitement au point de l'esprit des tailleurs. Une tradition plus ancienne devait avoir existé.

En 2010, les premiers indices d'une technologie antérieure firent surface. Cette année-là, l'équipe de Zeray Alemseged, de l'université



de Chicago, publia la découverte de traces de découpe sur des ossements trouvés à Dikika, en Éthiopie. Ces os dataient de 3,4 millions d'années, donc de plusieurs centaines de milliers d'années avant les plus anciens fossiles humains. L'équipe de Zeray Alemseged attribuait ces traces à *Australopithecus afarensis*, une espèce d'australopithèque encore très simiesque sous bien des aspects, puisqu'elle avait à peu près autant de matière grise qu'un chimpanzé et un corps encore adapté à la vie arboricole... Un animal fort éloigné de l'homme à gros cerveau pleinement adapté à la vie au sol censé avoir été le premier boucher.

Évidemment, les interprétations de l'équipe de Zeray Alemseged ne manquèrent pas d'être contestées. Certains experts voulurent voir sur ces os des traces de dents d'animaux. Aucun outil n'ayant été retrouvé sur place, argumentèrent les critiques, il était difficile de croire que les traces de Dikika étaient artificielles, de sorte que Dikika ne régla pas la question de l'ancienneté de la technique (voir l'entretien avec Zeray Alemseged, page 40).

Alors que s'amplifiait cette polémique, Sonia Harmand et Jason Lewis décidèrent de rechercher les très anciens outils dont les traces de Dikika et la complexité évidente de l'Oldowayen de Gona et de Lokalalei suggéraient l'existence. À l'été 2011, ils partirent en quête de nouveaux sites archéologiques sur la rive occidentale du lac Turkana.

Le bassin du lac Turkana, ainsi que la plus grande partie de la vallée du rift au sein de laquelle il se trouve, est un paradis pour les paléoanthropologues, tant il est riche en fossiles et en artefacts protégés par des strates rocheuses faciles à dater. Le volcanisme



UNE FOUILLE DIFFICILE

Les fouilleurs doivent extraire les sédiments au marteau et au burin (*cliché de gauche*). Des semaines peuvent s'écouler entre deux découvertes. Les premières trouvailles ont d'ailleurs consisté en de petits éclats produits pendant la taille (*ci-contre et ci-dessous*).

ininterrompu de la région et les variations du niveau de ses lacs ont constitué une sorte de gâteau stratifié de couches sédimentaires accumulées pendant des ères géologiques entières. Les eaux de ruissellement et l'érosion éolienne les ont ensuite érodées, exposant en divers endroits du bassin des tranches entières de ce gâteau. L'activité tectonique en a certes surélevé ou abaissé certaines portions, mais, tant qu'une partie de la succession des strates est préservée, les chercheurs peuvent toujours leur attribuer un âge en les situant quelque part dans la totalité de la séquence.

UNE GRANDE DÉCOUVERTE AU BOUT D'UN LIT ASSÉCHÉ

Afin de se déplacer à travers le rude paysage dénué de routes, l'équipe de Sonia Harmand emprunte le plus souvent les lits asséchés des rivières, les *lagas*, qui serpentent à travers la région. Le 9 juillet 2010, par la *laga* de Lomekwi, les chercheurs visaient de se rendre sur le lieu où, 12 ans auparavant, une autre équipe avait découvert un crâne de *Kenyanthropus platyops* (un hominidé vieux de 3,5 millions d'années) quand ils se trompèrent d'embranchement. Perdus, ils montèrent sur une petite colline pour mieux se repérer, et soudain comprirent qu'ils étaient tombés sur un site de fouille très prometteur: de très vieux sédiments lacustres, propres à conserver artefacts et fossiles, affleuraient tout autour. Et d'après la carte géologique établie par les chercheurs, ils avaient tous plus de 2,7 millions d'années... Ils décidèrent de jeter un œil.

En quelques heures, Sammy Lokorodi, l'un des Turkanas de l'équipe, trouva des pierres portant des marques de taille, comme si on leur avait enlevé des éclats. Pouvait-il s'agir des outils

préoldowayens que l'équipe était venue chercher? Peut-être. Toutefois, comme ces artefacts avaient été trouvés en surface, on pouvait penser qu'un homme moderne passant par là, par exemple un nomade Turkana, les avait façonnés puis abandonnés. Pour convaincre, les chercheurs devaient aussi trouver des outils enfouis dans un sédiment non perturbé depuis leur dépôt; puis procéder à une étude géomorphologique du site afin d'établir plus précisément leur âge. Le travail ne faisait que commencer.

En 2015, lors de la publication de la découverte dans la revue *Nature*, les chercheurs avaient extrait 19 outils d'un mètre carré de sol; ils avaient par ailleurs corrélié les strates du site à deux couches géologiques les ayant encadrées dans le passé: le tuff de Toroto, une couche de cendre volcanique datant de 3,31 millions d'années, et une strate ayant enregistré une inversion du champ magnétique terrestre il y a 3,3 millions d'années. Cela leur permit de dater à 3,33 millions d'années le sédiment contenant les outils. Il s'avère que ce dernier correspond à une plage fossile contenant des graviers de cendre volcanique consolidée, des phonolites (sorte de roches magmatique) ainsi que des fossiles de poisson et de crocodiles. Autant d'indices témoignant de la hauteur déjà atteinte par le lac Turkana... Ainsi, les outils de Lomekwi 3 ont 3,33 millions d'années. Soit 700 000 ans de plus que les pierres taillées de Gona et 500 000 ans de plus que le fossile humain le plus ancien...

Ces artefacts ont peu en commun avec ceux de l'Oldowayen, notamment parce qu'ils sont bien plus grands: certains éclats ont la largeur d'une main. Alors que les tailleurs de l'Oldowayen, explique Sonia Harmand, préféraient la >

EN CHIFFRES

3,3 millions d'années
C'est l'âge des outils de pierre taillée du site de Lomekwi 3.

500 000 ans
C'est le temps qui sépare le site de Lomekwi du plus ancien fossile humain connu.

3,4 millions d'années
C'est l'âge des plus anciennes marques de découpe trouvées sur un fossile osseux. Elles proviennent du site de Dikika, en Éthiopie.

> taille à mains libres, tenant le noyau rocheux à débiter d'une main pour frapper de l'autre avec une autre pierre – ce que l'on appelle la percussion directe lancée –, les tailleurs de Lomekwi 3 utilisaient deux méthodes: soit ils frappaient un nucléus tenu à deux mains contre un caillou posé au sol (percussion directe), soit ils posaient le nucléus sur une pierre et le frappaient avec un percuteur (percussion bipolaire sur enclume). Ces méthodes impliquent une

Pour le moment, l'équipe n'a découvert aucune trace d'hominine sur le site, sinon une unique dent énigmatique

certaine compréhension de la mécanique de la fracturation de la roche, mais une planification et une dextérité moindres que ne le manifeste l'industrie lithique de Gona et de Lokalalei (voir l'entretien avec Michel Brenet, pages 34-35). L'équipe de Sonia Harmand avait ainsi trouvé la tradition de taille préoldowayenne qu'elle cherchait: elle l'a nommé le Lomekwien.

Certains chercheurs n'ont pas été convaincus par l'ancienneté revendiquée des outils des pierres trouvées par l'équipe. Des sceptiques avancent que le groupe de Sonia Harmand n'a pas prouvé que les artefacts proviennent vraiment des sédiments d'il y a 3,33 millions d'années. Les découvertes faites au cours de la dernière saison, notamment des débris de taille ainsi que plusieurs outils insérés dans le sédiment, devraient aider à réfuter ces affirmations. Pour autant, même les chercheurs acceptant l'âge et le fait que les pierres de Lomekwi ont été taillées par des hominines restent perplexes devant les implications de la découverte.

UNE INDUSTRIE LITHIQUE DIFFICILE À INTERPRÉTER

Pour commencer, qui a façonné ces pierres? Pour le moment, l'équipe n'a découvert aucun reste d'hominine sur le site, sinon une unique dent énigmatique. L'âge et l'emplacement des outils suggèrent trois possibilités: *Kenyanthropus platyops*, le seul hominine dont on sait qu'il vivait >

DIKIKI: DES TRACES DE BOUCHERIE VIEILLES DE 3,4 MILLIONS D'ANNÉES?

Propos recueillis par FRANÇOIS SAVATIER

En 2010, cinq ans avant la publication de l'équipe Lomekwi 3, vous avez fait une incroyable annonce: la découverte de deux os striés par des tranchants de pierre à Dikika, en Éthiopie. Dikika, c'est quoi?

Zeray Alemseged: Il s'agit d'un vaste site fossilifère du nord-est de l'Éthiopie, celui-là même où mon équipe et moi avons découvert en 2000 le squelette partiel d'un enfant australopithèque datant de 3,4 millions d'années: l'«enfant de Dikika». Les os striés en question proviennent de la même strate que cet *Australopithecus afarensis* juvénile.

À quoi ressemblait ce site il y a 3,4 millions d'années?

Z. A.: Il était couvert de forêts en galerie de bord de fleuve et de lac, flanquées, à quelque distance, de savanes. L'ensemble constituait un habitat très comparable à celui des parcs du Serengeti au Kenya ou du Ngorongoro en Tanzanie. Le genre d'endroits où encore aujourd'hui, on ne peut faire plus de quelques pas sans tomber sur des restes osseux dispersés sur le sol, qu'il s'agisse de crocodiles, d'éléphants, d'herbivores et, bien sûr, de singes... C'est dans ce genre de milieux qu'il y a plus de 3 millions d'années, un groupe d'hominines a voulu obtenir de la chair à l'aide d'outils tranchants qui ont laissé sur des os de petites incisions en forme de V, caractéristique des activités de découpe.

Ces traces de découpe ont été fortement contestées...

Z. A.: Oh oui! Certains de nos collègues ont argué que les marques pouvaient être celles de crocs, tout



ZERAY ALEMSEGED
professeur de paléanthropologie
à l'université de Chicago, à l'origine de la
découverte de marques de découpe sur
deux os trouvés à Dikika, en Éthiopie

particulièrement de crocodiles. Une objection que nous avons vite contrée en mettant en évidence ce qui différencie les traces de dents de carnivores et celles que créent les lames de pierre. Du reste, nous avons même retrouvé un microrésidu de roche sur une paroi de l'une de nos marques.

Mais il y a eu une objection bien plus sérieuse...

Z. A. : Un groupe mené par Manuel Dominguez-Rodrigo, de l'université de Madrid, a en effet proposé qu'au cours des millions d'années, le piétinement par de gros animaux du sable contenant les os aurait indirectement créé des stries. La démarche de ces collègues est cependant curieuse: ils écrivent dans leur article que «dans un autre contexte», nos traces auraient été interprétées comme des traces de découpe, car elles en ont les caractéristiques. Traduction: pour eux, l'âge non contesté de 3,3 millions d'années des os striés de Dikika est trop grand. Cette difficulté à accepter notre interprétation traduit avant tout le refus d'abandonner l'*Homo faber*. Nous avons si longtemps pensé que seuls les humains ont pu fabriquer des outils, que c'en est presque devenu la définition du genre *Homo*... Or Dikika et plus encore Lomekwi prouvent qu'il y a 3,3 millions d'années, des préhumains ont façonné des outils et donc qu'un changement de paradigme s'impose.

Lomekwi vous a donc confortés?

Z. A. : Pas si simple: ces mêmes collègues qui contestaient farouchement Dikika contestent aujourd'hui Lomekwi...

Alors la controverse se poursuit?

Z. A. : Oui, mais elle nous fait progresser. Grâce à elle, nous avons compris qu'il fallait créer des méthodes de diagnostic qui rendent indiscutable l'identification de marques aussi particulières que les traces de découpe. Nous pensons que pour y parvenir, il faut mettre au point une caractérisation si poussée de ces traces d'origine humaine ou préhumaine, que, d'un point de vue probabiliste, il deviendra impossible de douter. Une étude poussée de la forme tridimensionnelle des marques de découpe d'origine humaine ou préhumaine à l'aide de microscopes de haute précision et de tomographes devrait nous permettre d'élaborer de tels diagnostics.

Il me semble d'autant plus essentiel de le faire que les marques de découpe préhumaines promettent d'être rarissimes. Les statistiques des ossements trouvés dans les sites fossilifères



Cette côte d'ongulé comporte des stries pratiquées à l'aide d'un outil tranchant en pierre. Elle provient d'une couche de sable formée il y a 3,4 millions d'années, où l'équipe de Zeray Alemseged a découvert de nombreux fossiles.

montrent que les hominidés sont longtemps restés très minoritaires dans la faune. Deux exemples: dans les sites étudiés de la vallée de l'Omo, sur plus de 50 000 fossiles osseux, pas plus de 200 sont humains; à Hadar, où l'*Australopithecus afarensis* Lucy fut découverte, 400 à 500 fossiles sont d'hominines, parmi plus de 20 000 autres familles animales.

Peu nombreux dans la faune, les australopithèques étaient aussi petits. Est-il crédible que des préhumains de moins de un mètre de haut aient débité les énormes éclats de Lomekwi?

Z. A. : Quiconque a déjà vu un capucin du Brésil déplacer une pierre faisant la moitié de sa hauteur ou senti la pression de la main d'un chimpanzé actuel n'en doute pas une seconde!

Pour autant, les hominines d'il y a plus de 3 millions d'années avaient-ils la main et le cerveau nécessaires?

Z. A. : Je le pense. Trois espèces d'hominines sont connues pour l'époque:

Kenyanthropus platyops, découvert non loin de Lomekwi et connu par son squelette crânien; *Australopithecus deyiremeda*, connu par des fragments de mâchoire; et *Australopithecus afarensis*, connu à la fois par son squelette crânien et subcrânien, dont celui de la main. Comme l'enfant de Dikika est un *afarensis*, mon équipe a attribué les marques de Dikika à son espèce. De même, l'équipe de Sonia Harmand a attribué le débitage lomekwien à *Kenyanthropus platyops*, car il a été découvert non loin de Lomekwi.

Bref, chaque équipe a choisi l'hominine le plus proche de son site...

Z. A. : Exactement, mais cela n'a rien d'essentiel. Ce qui compte, c'est que Dikika et Lomekwi montrent que les premiers fabricants d'outils étaient des australopithèques. Les trois taxons d'australopithèques que je viens d'évoquer devaient avoir des caractéristiques et des comportements proches et relèvent du même stade évolutif. Nous ne pouvons inférer de quoi leur main était capable de d'après l'étude extrêmement poussée de celle d'*afarensis*. Il en ressort pour moi que, vraisemblablement, la main des hominines d'il y a plus de 3 millions d'années était capable d'une préhension assez précise, peut-être déjà comparable à celle de la main humaine. Par ailleurs, on peut noter que leurs cerveaux étaient en moyenne légèrement plus volumineux que celui des chimpanzés actuels. Cela a dû leur suffire pour tailler la pierre et débiter des outils tranchants par les techniques qui ont été mises en évidence par l'équipe de Sonia Harmand.

Alors, un changement de paradigme s'impose vraiment...

Z. A. : Oui, au stade évolutif des australopithécins d'il y a 3,3 millions d'années, certains hominines ont découpé des carcasses et d'autres débité des tranchants. Ceux qui ont débité des carcasses l'ont fait pour accéder à la viande qu'elles portaient, ce qui n'a rien d'étonnant puisque nombre d'espèces de singes chassent et mangent de la viande. Si, par ailleurs, d'autres hominines ou les mêmes ont débité des outils tranchants, c'était bien pour découper de la matière végétale, animale ou les deux. La suite des recherches sur Lomekwi 3 nous dira peut-être quoi.

> dans le Turkana occidental lors de la création du site; *Australopithecus afarensis*, l'espèce australopithèque trouvée en association avec les os de Dikika; et *Australopithecus deyiremeda*, une espèce récemment nommée à partir d'un morceau de mandibule trouvé en Éthiopie. Tant *K. platyops* que *Au. afarensis* seraient surprenants, puisqu'ils avaient un cerveau de la taille de celui d'un chimpanzé et non le cerveau développé auquel les chercheurs s'attendent chez un tailleur de pierre (la taille du cerveau d'*Au. deyiremeda* reste inconnue).

Un petit cerveau n'est pas le seul trait que les spécialistes n'attendaient pas chez des tailleurs aussi anciens. Les paléanthropologues pensaient que les outils ne pouvaient être apparus qu'après l'abandon par nos ancêtres de la vie arboricole pour devenir de vrais bipèdes terrestres. Dans ce scénario, c'est seulement lorsque leurs mains ont été libérées des exigences de l'ascension dans les arbres que les hominines auraient pu développer des mains d'une forme permettant la production d'outils. L'étude d'*Au. afarensis*, la seule des trois espèces pour laquelle nous disposons du squelette sub-crânien (et celui de la main), montre que s'il était habile au sol, il restait capable de grimper dans les arbres, où il trouvait sans doute nourriture et sécurité. Quelle a été l'importance de la transition entre mode de vie arboricole et mode de vie terrestre dans l'émergence de la fabrication d'outils?

HOMO FABER OU AUSTRALOPITHECUS FABER ?

Les outils de Lomekwi 3 obligent aussi les chercheurs à reconsidérer les raisons pour lesquelles les hominines ont inventé des outils de pierre. La reconstitution des paléoenvironnements de la région de Lomekwi il y a 3,3 millions d'années montre qu'elle était boisée et donc qu'il ne s'agissait pas de la savane que les préhistoriens avaient imaginée être responsable de l'émergence des talents de tailleurs de pierre chez *Homo*.

Enfin, la question essentielle reste sans doute celle de l'isolement chronologique des outils de Lomekwi 3. Si la fabrication d'outils procurait l'avantage adaptatif décisif dont parlent les spécialistes, pourquoi ne s'est-elle pas répandue dès son apparition, enclenchant la boucle amplificatrice qui a produit le gros cerveau?

Des recherches récentes pourraient expliquer comment un hominine plus primitif qu'*Homo* pourrait en être venu à fabriquer des outils. Il s'avère en effet que les différences cognitives entre hominines et autres primates ne sont pas aussi grandes que ce que l'on croyait.

L'observation de notre cousin primate le plus proche, par exemple, suggère que même si dans les conditions de la vie sauvage les chimpanzés



ne fabriquent pas d'outils, ils possèdent beaucoup des capacités cognitives nécessaires pour le faire. David Braun, de l'université George-Washington, et Susana Carvalho, de l'université d'Oxford, ont découvert qu'à Bossou, en Guinée, les chimpanzés sauvages qui se servent de pierres pour casser des noix comprennent les caractéristiques physiques des différents rochers. Même s'ils n'ont pas d'expérience passée avec un type de cailloux, ils détectent ceux qui conviennent le mieux à leur tâche.

Nicholas Toth, de l'Institut de l'âge de pierre à Blomington, dans l'Indiana, et ses collègues ont réalisé une expérience avec des bonobos en captivité et montré qu'il est possible de les entraîner à produire des éclats coupants afin de couper des cordes. «Je ne doute pas du fait que nos singes pourraient imiter les outils que l'équipe d'Harmand a trouvés à Lomekwi, si on leur donnait le bon matériau de départ», avance-t-il.

Même le fait d'inventer des outils pourrait ne pas avoir exigé un génie aussi considérable qu'on ne le croit. À l'automne dernier, Tomos Proffitt, de l'université d'Oxford, et ses collègues ont observé que des capucins du Parc national de Capivara, au Brésil, produisent fortuitement des éclats tranchants ressemblant à des éclats oldowayens. Les galets de quartzite sont très fréquents dans leur habitat. Souvent, les capucins s'emparent de l'un d'eux et le choquent contre un autre engoncé dans le sol. Cette activité produit des éclats tranchants ayant les caractéristiques de ceux que l'on taille intentionnellement: des éclats dont la face interne a été creusée par

De la largeur d'une main, cet éclat a été débité à Lomekwi il y a 3,3 millions d'années. Le fut-il pour son tranchant? Pour découper de la chair animale, des racines ou du bois? Les chercheurs s'interrogent mais manquent d'indices à ce stade.



la conchoïde, c'est-à-dire par le cône formé par l'onde de choc. Les capucins produisent, semble-t-il, ces éclats seulement fortuitement et ne s'y intéressent pas. Ils semblent plutôt chercher à pulvériser le quartz pour l'ingérer, puisqu'ils s'arrêtent entre leurs percussions pour lécher la poudre de pierre qu'ils ont produite. Les anciens hominines ont peut-être eux aussi inventé le débitage d'éclats par accident, ou ils auraient découvert des pierres tranchantes naturelles et seulement plus tard, après avoir compris leur utilité, ils se seraient mis à en produire intentionnellement...

La possibilité que les facteurs d'outils de Lomekwi aient eu des mains capables à la fois de les faire grimper dans les arbres et de tailler des pierres ne semble pas non plus improbable, si l'on considère de quoi nos cousins primates sont capables. La main humaine moderne, avec ses doigts courts et droits et son long pouce opposable, semble construite pour développer de la puissance, de la précision et de la dextérité, autant de caractéristiques que nous exploitons chaque fois que nous nous servons d'un marteau, tournons une clé ou envoyons un texto. Toutefois, les observations de chimpanzés, de bonobos et de capucins montrent que d'autres primates dotés de mains spécialisées pour saisir des branches peuvent développer une dextérité surprenante. Les mains des hominines, qui n'étaient que partiellement arboricoles, ont pu être aussi performantes.

Si la fabrication d'outils procurait un avantage adaptatif décisif, alors pourquoi ne s'est-elle pas répandue ?

En réalité, les recherches récentes sur les os de mains fossilisées de trois hominines à petits cerveaux d'Afrique du Sud – *Australopithecus africanus*, *Au. sediba* et *Homo naledi* – livrent des indices de la combinaison de ces activités. Les trois espèces ont les doigts recourbés, trait associé à l'escalade dans les arbres. Pour autant, leurs mains ressemblent à celle de facteurs

d'outils. Tracy Kivell et Matt Skinner, tous deux à l'université du Kent, en Angleterre, ont étudié les structures internes de leurs os, lesquelles reflètent les forces qu'ils ont supportées pendant la vie. Ils ont ainsi montré qu'il peut s'agir de mains d'hominines ayant produit et employé des outils lithiques. «Être un habile grimpeur et un facteur d'outil ne s'excluent pas mutuellement», estime Tracy Kivell. Des mains de formes variées peuvent produire et employer des outils. Les évolutions de la main humaine n'auraient fait que l'optimiser pour cela.

SOIRÉE CHOMA (BARBECUE)

Le vendredi, l'équipe de Lomekwi a droit à une soirée *Choma*: de la chèvre grillée est servie au dîner. Un Britannique plein d'humour, Nick Taylor, de l'université de Stony Brook, en profite pour essayer de comprendre à quoi les outils de Lomekwi servaient. Le matin même, un berger turkana a amené la chèvre que l'équipe lui a achetée. Et pendant l'après-midi, alors que le soleil décline et que la préparation du repas du soir commence, Nick Taylor demande à Alfred Koki, le cuisinier du camp, d'essayer de débiter la carcasse de la chèvre avec des répliques de tranchants lomekwiens. Alfred Koki, boucher expérimenté, doute de leur efficacité, mais s'exécute par jeu. S'emparant d'un éclat long de cinq centimètres, il commence à trancher. Après avoir retiré la peau de l'animal, il découpe une partie de sa viande à l'aide de tranchants de pierre qu'il jette à mesure qu'ils s'émoussent; il finit par reprendre son couteau d'acier pour terminer le travail.

Nick Taylor note comment Alfred Koki tient instinctivement chaque éclat et combien de temps il s'en sert avant d'en réclamer un autre. Il ramasse les éclats utilisés afin de pouvoir plus tard comparer leurs arêtes endommagées à celles des éclats préhistoriques. Il emportera aussi une partie des ossements afin d'étudier les traces de découpe qui s'y trouvent. Plus tard, il essaiera de se servir d'éclats tranchants lomekwiens afin de découper de la matière végétale, notamment du bois et des racines. Nick Taylor recherchera aussi les éventuels résidus organiques encore présents sur les outils de Lomekwi, qui pourraient indiquer à quoi ils ont servi.

Quelle que soit la raison pour laquelle les hominines de Lomekwi produisaient des outils, leur tradition de taille ne semble pas avoir perduré. Près de 700000 ans séparent leur production des outils les plus anciens après eux: ceux de Gona. Il est possible que les hominines de Lomekwi aient développé une tradition de taille ayant perduré pendant tout ce temps, mais que les archéologues ne l'aient pas encore trouvée. Il se pourrait aussi que la taille pratiquée à Lomekwi n'ait été qu'un éclair dans la nuit, sans rapport avec la culture oldowayenne qui allait suivre. Le >

> registre oldowayen aussi est fragmentaire et variable, et comporte plusieurs styles liés à des lieux, sans beaucoup de continuité entre eux. Comme le résume Hélène Roche: il n'y a pas un Oldowayen, mais des Oldowayens.

Cette situation suggère à beaucoup d'archéologues que les populations de plusieurs lignées d'hominines et peut-être d'autres primates ont pu expérimenter la production d'outils indépendamment, puis que leur inventivité s'est épuisée. «Nous avons pris l'habitude de penser que la course a été gagnée dès que la fabrication d'outils nous a placés en tête, observe Dietrich Stout, de l'université Emory, mais il est possible que la technique n'ait pas été importante pour l'adaptation de ces populations anciennes, de sorte qu'elle s'est simplement évanouie.»

Il y a environ 2 millions d'années, cependant, quelque chose a changé. Les outils fabriqués à cette époque sont de plus en plus normalisés. Vers 1,7 million d'années, une technologie sophistiquée apparaît: l'Acheuléen. Connue pour son hachereau, le biface qui passe pour le couteau suisse du Paléolithique, la tradition acheuléenne s'est répandue en Afrique et en Eurasie.

David Braun pense que cette rupture est liée à une amélioration de la transmission entre individus. Lorsqu'ils apprennent en imitant, les chimpanzés semblent ne disposer que de ce que David Braun nomme une transmission peu fidèle. Cela fonctionne plutôt bien pour des tâches simples: à Bossou, à la fin des six semaines d'observation, tous les chimpanzés employaient les pierres de façon identique. Le savoir-faire semblait se répandre à la faveur d'une sorte de recyclage: un individu – un jeune généralement – en regarde un autre – un adulte le plus souvent – casser des noix avec une certaine pierre; après quoi, il tente d'accomplir la même tâche en se servant du même outil.

Les hommes modernes, eux, enseignent activement aux autres comment accomplir des tâches complexes – cuire un gâteau, piloter un avion, etc. – en employant un mode de transmission bien plus fidèle. Il est possible, suggère David Braun, que la variabilité visible dans les outils de Lomekwi et dans ceux de l'Oldowayen précoce soit le produit d'une transmission peu efficace, tandis que l'apparition d'une norme dans l'Oldowayen tardif, puis dans l'Acheuléen, signale le développement d'un mode de partage des connaissances plus performant; cela aurait permis aux humains d'augmenter fortement la complexité de leurs technologies.

Même si les outils de Lomekwi 3 sont très anciens, l'équipe de Sonia Harmand s'attend à ce que des outils encore plus anciens se trouvent quelque part. Un jour, alors que le reste de l'équipe fouillait, Jason Lewis, Sammy Lokorodi et Xavier Boës, un géologue de

l'Inrap, sont partis à leur recherche. Ils se sont dirigés vers une zone dont les sédiments sont plus anciens encore que ceux de Lomekwi 3, remontant le *laga* dans un nuage de poussière avec l'intention de ne pas manquer cette fois l'embranchement qu'ils avaient l'intention d'emprunter cinq ans plus tôt, lorsqu'ils ont découvert Lomekwi 3.

Arrivés à destination, ils se dispersèrent en fixant leur regard entraîné sur le sol, à la recherche de signes d'artefacts dans la mer des cailloux cuits comme des briques par le soleil. Très vite, Sammy Lokorodi trouva des



Nick Taylor note comment le cuisinier du camp découpe la chèvre grillée avec des outils de pierre...



galets taillés, qui pourraient avoir plus de 3,5 millions d'années. Avant de l'affirmer, l'équipe devra cependant suivre la même procédure rigoureuse qu'à Lomekwi 3: déterminer si ces pierres ont été façonnées à la main, trouver de quelle strate l'érosion les a extraites, la dater, puis y découvrir des artefacts enfouis... Jason Lewis prend les pierres en photo et note leur emplacement pour le futur. L'équipe veut aussi explorer des sédiments prometteurs vieux de plus de 4 millions d'années, à cinq kilomètres de Lomekwi 3.

Déterminer quelles technologies ont pré-existé à Lomekwi 3 et lui ont succédé, et comment l'environnement a évolué, sera nécessaire afin d'élucider les liens possibles entre les changements de régime alimentaire, la fabrication d'outils et l'évolution du genre *Homo*. «Il est possible que les liens établis traditionnellement soient les bons, mais qu'ils se soient installés bien plus tôt qu'on ne le pensait, suggère Jason Lewis. Nous avons séparé les pièces du puzzle, mais cela ne veut pas dire qu'il sera impossible de les réassembler.» Hélène Roche, elle, voit les découvertes du Turkana occidental ainsi: «Nous en savons beaucoup, mais pas assez.» À suivre donc. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. Harmand et al., **3.3-million-year-old stone tools from Lomekwi 3, West Turkana, Kenya**, *Nature*, vol. 521, pp. 310-315, 2015.

T. Proffitt et al., **Wild monkeys flake stone tools**, *Nature*, vol. 539, pp. 85-88, 2016.

F. Savatier, **Des outils de pierre plus vieux que l'humanité**, *Pour la Science*, actualité en ligne le 22 mai 2015.

EXPO



VALERIAN ET LAURELINE

en mission pour la Cité

13 JUN 2017
14 JANVIER 2018

M PORTE DE LA VILLETTE

#ExpoValerian



Je Mézières

ICI L'AFFICHE
AUGMENTÉE



AVEC LE SOUTIEN DE



BNP PARIBAS

EN COLLABORATION AVEC

DARGAUD

EN PARTENARIAT AVEC

MY TFI

Syfy

CNEWS Matin

SCIENCE



MICHEL BRENET

Michel Brenet, de l'Inrap, est aussi membre du laboratoire Pacea (CNRS et université de Bordeaux), où il mène diverses recherches sur les techniques de taille du Paléolithique inférieur (3,3 millions à 0,3 million d'années), notamment sur la taille des bifaces.



Des techniques de taille simples, mais exigeantes

COMMENT SAVONS-NOUS QUE LES TRÈS ANCIENS ÉCLATS DÉCOUVERTS SUR LE SITE KÉNYAN DE LOMEKWI SONT DES OUTILS TAILLÉS ? ET À QUOI SERVAIENT-ILS ? MICHEL BRENET, SPÉCIALISTE ROMPU AUX TECHNIQUES DE TAILLE DU PALÉOLITHIQUE INFÉRIEUR, NOUS LIVRE LES RÉSULTATS DE SES EXPÉRIMENTATIONS.

Selon vous, des hominines ont-ils taillé la pierre à Lomekwi 3 ?

Nous étudions intensément ce site depuis cinq ans et si nous avons le moindre doute là-dessus, nous l'aurions déjà abandonné.

Il est donc exclu que des processus géologiques aient « taillé » les pierres ?

Absolument. Certes, il est toujours possible d'imaginer quelque phénomène bizarre et exceptionnel: roulant sur une pente, un bloc aura heurté une autre pierre, assez fort pour produire un éclat... Mais en réalité, ce genre de scénario semble plus qu'improbable quand on observe les pierres taillées de Lomekwi. D'abord, on ne peut expliquer par la géologie leur présence: ces « cailloux » n'ont ni les dimensions ni la composition des roches du voisinage. Il faut donc bien qu'ils aient été apportés là par un être vivant. Ensuite, si les fracturations et impacts qu'elles portent étaient naturels, on devrait les observer sur n'importe quelle partie du bloc: ils devraient être chaotiques. Or sur nos blocs archéologiques, ces fracturations ont entraîné des enlèvements réguliers et répétés: 140 de ces blocs et éclats présentent des indices d'un débitage non aléatoire et cohérent. Notamment une forte concentration de traces d'impact sur certains d'entre eux.

Est-ce votre expérience de tailleur de pierre qui vous permet d'interpréter ces traces d'impact ?

Tout à fait. Je taille par des techniques variées depuis près de trente ans et, malgré toute ma pratique, je sais bien qu'il m'arrive encore de ne pas percuter d'emblée un bloc au bon endroit, voire de devoir répéter les coups sur une pierre particulièrement résistante. Ce genre d'erreur multiplie les traces de coups sur les blocs ou sur les talons d'éclats, ce qui est exactement ce que nous observons sur ces artefacts de plus de 3 millions d'années...

Donc aucun doute possible: les blocs de Lomekwi ont été taillés par quelqu'un...

Oui, et ce « quelqu'un » – un groupe de tailleurs – a sélectionné des blocs massifs sur un autre site, les a apportés à Lomekwi et les a fracturés...

Et comment ces tailleurs s'y sont-ils pris ?

De deux façons: soit ils ont frappé l'extrémité d'un bloc sur un autre, volumineux, posé au sol: c'est la percussion sur percuteur dormant (*voir la figure page 42*); soit ils ont appuyé le bloc à débiter – le nucléus – sur un bloc posé au sol, l'enclume, avant de le frapper à l'aide d'un percuteur de pierre: c'est la percussion bipolaire sur enclume (*voir la figure page 43*).

Plus précisément, quels gestes les tailleurs de Lomekwi effectuaient-ils ?

Dans la taille sur percuteur dormant, le bloc à exploiter est maintenu à deux mains d'un côté afin de débiter et de façonner son extrémité opposée en le frappant sur une saillie du bloc posé. Le tailleur frappe en série sur le percuteur dormant et débite des éclats sur l'une des faces du bloc qu'il tient. Sur la partie aménagée, c'est-à-dire travaillée, du bloc, les zones où de la matière a été détachée sont bordées par une arête robuste plus ou moins aiguë, de sorte que le bloc débité peut être considéré comme un nucléus, mais aussi comme un outil tranchant potentiel...

Et dans la percussion bipolaire sur enclume ?

Dans ce cas, le bloc à débiter est posé et tenu d'une main sur l'enclume pendant qu'il est percuté sur un bord anguleux avec le percuteur tenu dans l'autre main. Les éclats sont détachés sur les surfaces verticales du nucléus soit par l'impact du percuteur, soit, parfois, par le contrecoup sur l'enclume. D'où l'expression « percussion bipolaire sur enclume ».

Comment décririez-vous les avantages de l'une et l'autre méthode ?

La percussion sur percuteur dormant est simple d'exécution, mais elle suppose une très bonne précision dans les mouvements des blocs à exploiter et le choix des points d'impact. Avec elle, on débite facilement des blocs volumineux de forme asymétrique en les maintenant par leur extrémité épaisse avant de frapper sur le bord opposé, plus fin. Elle produit des éclats relativement épais et robustes, ce qui était sans doute recherché pour certains usages...

Même si elle semble plus complexe, puisqu'elle mobilise trois pierres, la percussion bipolaire sur enclume est en fait celle des deux techniques qui demande le moins de savoir-faire et d'habileté, tout en étant très productive, puisqu'elle permet d'exploiter très vite des blocs à faces quadrangulaires: on les fait pivoter sans cesse afin de détacher des éclats sur tout le pourtour du bloc, en frappant à l'aplomb des faces déjà entamées.

En fait, la percussion bipolaire sur enclume est la technique de taille à laquelle chacun vient ou revient naturellement quand il essaie spontanément de tailler une pierre, et on observe qu'elle a été pratiquée pendant tout le Paléolithique et jusqu'au Néolithique sur des roches variées...

Elle a aussi l'avantage d'être la seule véritablement applicable quand il s'agit de travailler un bloc très résistant aux chocs ou qui ne peut être débité autrement, étant donné les angles de frappe nécessaires pour obtenir des éclats. ➤

> De quel angle s'agit-il ?

L'une des lois de la fracturation intentionnelle de roches dures est que pour détacher un éclat d'un bloc, on doit frapper sur celui-ci à l'aide d'un percuteur sur le bord d'une arête d'angle inférieur à 90°. Si elle est bien orientée par la frappe du tailleur, l'onde de choc se développe depuis le point d'impact vers l'autre bord de l'arête et casse la roche formant ainsi un éclat.

Si l'angle de l'arête s'approche de 90° ou dépasse, cette valeur, l'onde de choc créée se propage à l'intérieur du bloc au lieu de se diriger vers les bords extérieurs. Elle ne détache donc pas d'éclat. La percussion sur enclume permet, en tapant assez fort, de s'affranchir en partie de cette loi et de fragmenter la pierre en frappant toujours près d'une arête dont l'angle peut être compris entre 85 et 90°, voire 95°...

Une durée de 700 000 ans sépare la taille lomekwienne des plus anciennes industries de taille connues. Le Lomekwien peut-il en être l'ancêtre ?

Nous pensons que non. Les plus anciens outils connus après ceux du Lomekwien auxquels vous faites allusion sont ceux de l'Oldowayen. Or ce style de taille se caractérise par le développement d'une nouvelle technique, que nous nommons la percussion directe lancée et que les anglophones nomment le *free hand knapping*, la «taille à mains libres» si vous



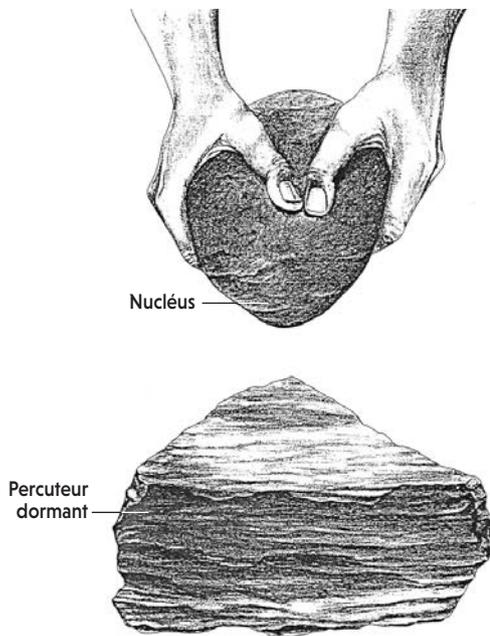
voulez (voir la figure page 44). En tenant le nucléus d'une main et le percuteur de l'autre, le tailleur obtient des éclats moins grands et plus réguliers en dépensant aussi relativement peu d'énergie. C'est donc une technique suffisamment efficace pour avoir dominé pendant tout le Paléolithique et perduré au Néolithique. Mais c'est aussi une technique plus difficile à maîtriser que celles dont nous avons précédemment parlé. Elle exige probablement des capacités cognitives de planification plus développées. Et aussi des mains suffisamment agiles.

On pense que les *Homo habilis* auxquels on attribue généralement l'invention de l'Oldowayen pouvaient tenir des pierres pratiquement comme nous le faisons. Mais qu'en était-il des tailleurs de Lomekwi? Nous n'en avons aucune idée. S'ils ont pratiqué la percussion directe lancée, alors ils l'ont très peu fait. Nous n'avons jusqu'alors retrouvé aucun outil de type oldowayen. Et d'après nos expériences, la plupart des blocs taillés de Lomekwi sont de toute façon trop gros pour avoir pu être débités à mains libres, alors que les deux techniques de percussion que j'ai nommées se prêtent bien à l'exploitation de matrices volumineuses.

Et comment avez-vous mené ces expériences ?

En 2013 et 2014, avec l'équipe du projet *Anchor* (pour «archéologie des origines») dirigée par Sonia Harmand, nous nous sommes livrés à 26 essais de débitage bipolaire en percussion sur enclume posée au sol, à 31 tests de débitage sur percuteur dormant et à 6 essais

Michel Brenet en pleine expérimentation de la percussion sur percuteur dormant. Dans la technique de taille testée ici, il a adopté une position accroupie avec les pieds à plat sur le sol, et revêtu un habit expérimental équipé de capteurs d'intensité musculaire et de boules lumineuses facilitant la prise d'images. L'habit comporte également un gant conçu pour conférer à sa prise certaines caractéristiques.



LA PERCUSSION SUR PERCUTEUR DORMANT

Le tailleur tient à deux mains le bloc à débiter – le nucléus – et le frappe sur une saillie appartenant à un bloc posé au sol – le percuteur dormant. Cette technique, qui exige de la force, produit des éclats épais et robustes.



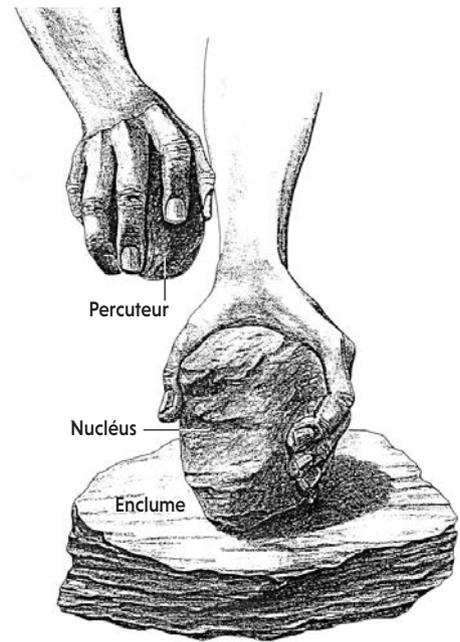
Michel Breneir/projet ARCHOR

de débitage en percussion directe lancée. Pour réaliser ces expériences, nous avons importé du Kenya quelque 800 kilogrammes de blocs volcaniques comparables à ceux de Lomekwi, sur lesquels nous avons mis en œuvre les deux méthodes de percussion que j'ai décrites. Toutefois, nous avons imposé au tailleur – moi, en l'occurrence – d'adopter des postures imitant les positions que d'après nos paléo-anthropologues, le corps d'un australopithèque pouvait prendre : assis sur le sol avec les jambes fléchies, debout avec les jambes fléchies et accroupi avec les talons à plat, assis et légèrement surélevé (voir la photographie ci-contre).

Toute une gymnastique ! Sur les films que vous avez tirés de ces essais, on vous voit modifier aussi les positions que vos doigts pouvaient adopter...

Oui, nous avons combiné ces positions corporelles avec trois types différents de « maintien », en d'autres termes de saisie des pierres. Là encore, nous avons suivi ce que pensent les paléoanthropologues sur les « mains » plausibles d'après les fossiles de l'époque de Lomekwi.

La première de ces mains comporte un pouce non opposable maintenu dans l'axe des doigts, lesquels sont accolés tandis que la paume est rigide. Il s'agit en fait d'une imitation à partir de notre main du « crochet



LA PERCUSSION BIPOLAIRE SUR ENCLUME

Le tailleur maintient d'une main le bloc à débiter – le nucléus – au contact d'un bloc posé au sol – l'enclume – et le frappe avec une autre pierre, le percuteur, qu'il tient de son autre main afin de détacher un éclat. Il fait ensuite pivoter le nucléus afin de débiter l'éclat suivant.

Puis nous sommes allés vers davantage de liberté de mouvement pour les doigts. Nous avons d'abord essayé la préhension latérale – en anglais le *pad to side* – une position de la main dans laquelle le pouce est libre mais non opposable aux autres doigts toujours accolés. Finalement, il nous fallait aussi une main plus proche de la main humaine. Nous avons donc fait des essais avec ce que nous avons nommé la « pince à trois mors » : une main dotée d'un pouce opposable, d'un index libre et dont les trois autres doigts sont accolés.

Et quelle est votre principale observation ?

La simplicité des techniques lomekwienne. Et aussi la force qu'elles exigent, notamment lorsque la roche est très dure comme c'est ici le cas. Dans les conditions où nous les avons testées, la percussion directe et la percussion bipolaire sur enclume se révèlent faciles à mettre en œuvre, mais exigent beaucoup de précision et une force de frappe qui n'existe pas dans les tailles à mains libres postlomekwienne. Comme je les ai beaucoup pratiquées, notamment l'oldowayenne et l'acheuléenne qui lui succède, je sais bien que ces techniques n'exigent jamais l'emploi d'une force aussi grande que celle nécessaire pour pratiquer la taille lomekwienne. >

Les techniques utilisées par les tailleurs de Lomekwi exigent beaucoup de précision et une force de frappe impressionnante

anatomique» dont se servent les singes arboricoles pour se suspendre aux branches. Nous l'avons obtenue avec un gant spécial liant les doigts ensemble et rigidifié par la présence d'une coupelle contre la paume.

> Pourquoi cette force ?

Pour une raison évidente: les blocs à manipuler sont énormes! Nous les avons pesés: ceux que les tailleurs du Lomekwien ont juste essayés pèsent entre trois et quatre kilogrammes; ceux qu'ils ont débités, qui ont perdu 20 à 30 % de leur masse, pèsent encore deux à trois kilogrammes. C'est pourquoi nous avons choisi pour nos essais des blocs de poids équivalents.

Vous ne vous êtes pas abîmé les mains en réalisant toutes ces expériences ?

Si. Au bout d'une semaine, j'avais mal aux mains... Mais j'estime que cela vient de l'intensité et de la répétition de nos essais. Je doute que des hominines d'il y a plus de 3 millions d'années aient jamais taillé d'affilée une centaine de blocs...

Après toutes ces expériences, que peut-on dire de la fonction des outils de Lomekwi ?

D'une manière générale, au Paléolithique, les outils étaient conçus pour découper une carcasse au retour de la chasse et, aspect très souvent sous-estimé, travailler le bois ou l'os. Avec cela en tête, je dirais qu'à Lomekwi, nous sommes dans la production d'éclats tranchants, qui tels des couteaux, sont probablement destinés à être utilisés pour couper, tailler, trancher...

Trancher quoi ?

Question difficile, car sur ce point nous n'en sommes qu'au début. Pour avancer, nous venons d'élaborer le protocole expérimental qui nous permettra de mener des essais d'utilisation d'éclats sur divers matériaux, sur du bois, sur de la viande, pour désarticuler des carcasses, pour les décharner...

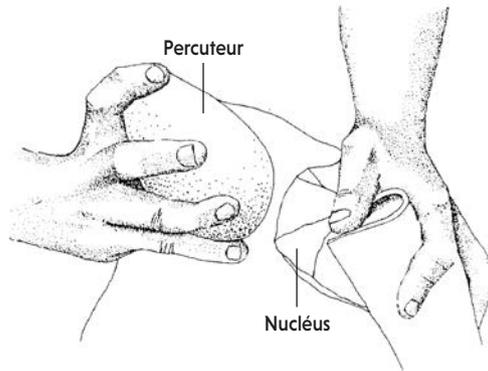
Nous devons aussi penser aux diverses utilisations envisageables des blocs, telles que le concassage de noix et le broyage de racines.

C'est ce que vous faites avec vos collègues du projet Anchor Nick Taylor et Adrian Arroyo ?

Oui, ils sont en charge de la recherche sur les modes de fonctionnement des éclats et des macro-outils que représentent peut-être certains blocs. Ils s'occupent aussi de rechercher des traces de leur utilisation.

Existe-t-il une chance qu'après plus de 3 millions d'années de telles traces subsistent ?

Nous ne l'avons pas exclu, de sorte que pour ne pas gâcher nos chances d'en découvrir, nous avons manipulé tout le matériel avec les plus extrêmes précautions, notamment en mettant des gants stériles. Les traces peuvent être de deux sortes: des microtraces laissées par le fait de trancher qui ne sont visibles qu'au microscope; et des macrotraces visibles à l'œil



LA PERCUSSION DIRECTE LANCÉE

Le tailleur tient le bloc à débiter
– le nucléus – d'une main
et le frappe avec une autre pierre
– le percuteur – tenue dans l'autre main. Cette méthode produit à partir de blocs plus petits des artefacts – éclats et outils taillés – plus petits qu'avec la taille sur percuteur dormant et en percussio bipolaire sur enclume.

nu produites par des chocs, par exemple lors de l'utilisation d'un éclat comme hachereau.

Ces recherches sont en cours, mais, s'agissant des microtraces, il est probable qu'après plus de 3 millions d'années, divers phénomènes physicochimiques naturels les aient effacées; s'agissant des macrotraces, rien n'empêche qu'il y en ait. Par ailleurs, Nick Taylor regarde aussi s'il ne subsisterait pas d'éventuels résidus organiques susceptibles de nous guider.

Si l'on résume, les outils de Lomekwi ont probablement servi surtout à trancher et peut-être aussi à hacher. Que nous disent-ils sur leurs fabricants ?

Ce que je peux dire, c'est que les individus de Lomekwi étaient capables de comportements planifiés: ils ont su utiliser de gros blocs plutôt que de plus petits moins bien adaptés pour débiter à l'avance les outils efficaces dont ils avaient besoin. Dans le même temps, leur comportement était aussi opportuniste: ils se sont peut-être procuré le cadavre d'un animal, qu'ils ont exploité ensuite.

Donc, pas de chasse. Nous sommes plutôt dans un cas de charognage ?

Je n'ai pas d'avis tranché là-dessus, mais il n'est pas inenvisageable qu'un hominidé déjà largement terrestre et capable de fabriquer les outils nécessaires pour débiter une carcasse ait aussi chassé. ■

Propos recueillis
par François Savatier,
Pour la Science

BIBLIOGRAPHIE

- S. Harmand et al., **3.3-million-year-old stone tools from Lomekwi 3, West Turkana, Kenya**, *Nature*, vol. 521, pp. 310-315, 2015.
- P. De la Peña, **A qualitative guide to recognize bipolar knapping for flint and quartz**, *Lithic Technology*, vol. 40(4), pp. 316-331, 2015.
- A. Delagnes et H. Roche, **Late Pliocene hominid knapping skills: The case of Lokalalei 2C, West Turkana, Kenya**, *Journal of Human Evolution*, vol. 48, pp. 435-472, 2005.
- D. E. Crabtree, **An introduction to flintworking**, Article occasionnel du Muséum de l'université d'État de l'Idaho, Pocatello, Idaho, n° 28, 1972.
- F. Bordes, **Étude comparative des différentes techniques de taille du silex et des roches dures**, *L'Anthropologie*, tome 51, pp. 1-29, 1947.

Quand les machines apprendront comme des enfants

SI L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE A CONNU RÉCEMMENT UN GRAND ESSOR, C'EST GRÂCE À DES APPROCHES AYANT DES POINTS COMMUNS AVEC L'APPRENTISSAGE DES JEUNES ENFANTS – LESQUELS SURPASSENT ENCORE DE LOIN LES MACHINES!



L'ESSENTIEL

> Comment les jeunes enfants apprennent-ils ? Cette question préoccupe depuis longtemps philosophes et psychologues – et désormais les informaticiens.

> Les spécialistes de l'intelligence artificielle étudient les capacités de raisonnement des très jeunes enfants pour conférer

aux machines des capacités d'apprentissage automatique.

> Il existe deux stratégies concurrentes d'apprentissage automatique qui tentent, souvent avec difficulté, de reproduire ce que les enfants font naturellement. Elles ont commencé à transformer le domaine de l'intelligence artificielle.

L'AUTEURE



ALISON GOPNIK
professeure de psychologie
et professeure affiliée
de philosophie à l'université
de Californie à Berkeley,
aux États-Unis



Si vous passez beaucoup de temps avec de jeunes enfants, vous êtes sans doute émerveillé par leur capacité à apprendre et par la rapidité de cet apprentissage, et vous vous demandez comment cela est possible. Les philosophes, à commencer par Platon, se sont également posé la question, sans trouver de réponse satisfaisante. Mon petit-fils de 5 ans, Augie, a acquis des connaissances sur les plantes, les animaux et les horloges, sans parler des dinosaures et des vaisseaux spatiaux. Il est également capable de deviner ce que d'autres personnes veulent, ce qu'elles pensent et ce qu'elles ressentent. Il peut utiliser ces connaissances pour classer ce qu'il voit et entend, et faire de nouvelles prédictions.

Par exemple, Augie a dernièrement proclamé que l'espèce de titanosaure récemment découverte et exposée au Muséum américain d'histoire naturelle à New York est un herbivore, et que cet animal n'est donc pas si effrayant que cela.

Et pourtant, pour l'essentiel, Augie ne reçoit de son environnement que des photons venant frapper la rétine de ses yeux et des vibrations de l'air atteignant le tympan de ses oreilles. À partir de ces informations, son cerveau parvient d'une façon ou d'une autre à faire des prédictions sur les titanosaures herbivores.

Des ordinateurs électroniques pourraient-ils en faire autant? Depuis une quinzaine d'années, des informaticiens et des psychologues essaient de trouver une réponse. Comprendre comment fonctionne le cerveau des enfants pour ensuite en créer une version logicielle qui fonctionne aussi bien reste un défi pour les informaticiens. Mais entre-temps, ils commencent à développer des intelligences artificielles qui incorporent une partie de ce qu'on sait des mécanismes d'apprentissage chez les humains.

Passé l'enthousiasme des années 1950 et 1960, le domaine de l'intelligence artificielle a longtemps stagné. Mais il a connu ces dernières années des progrès remarquables, en particulier dans le domaine de l'apprentissage automatique. De nombreuses prédictions utopistes ou apocalyptiques ont émergé concernant la signification de ces avancées. Selon les points de vue, optimistes ou pessimistes, on imagine que ces développements annoncent, par exemple, l'immortalité ou la fin du monde...

Si ces progrès de l'intelligence artificielle suscitent des sentiments aussi intenses, c'est peut-être à cause de la crainte profonde que nous inspire le «presque humain». L'idée que des créatures pourraient faire se rejoindre l'humain et l'artificiel a toujours profondément troublé, du golem médiéval au monstre de Frankenstein et à Ava, la très sexy androïde fatale du film *Ex machina*.

Mais l'apprentissage des ordinateurs se rapproche-t-il vraiment de celui des humains? Les

détails de la façon dont un ordinateur apprend à reconnaître, par exemple, un chat, un mot parlé ou un caractère japonais peuvent être difficiles à suivre. Cependant, à y regarder de plus près, les idées de base derrière l'apprentissage automatique ne sont pas aussi déroutantes qu'il y paraît.

UNE APPROCHE ASCENDANTE

L'une des approches pour un tel apprentissage consiste à s'appuyer sur le flux de photons et de vibrations de l'air qu'Augie, comme nous tous, reçoit, et qui atteint l'ordinateur sous forme de pixels d'une image numérisée ou d'échantillons d'un enregistrement sonore. L'ordinateur essaie alors de repérer dans les données numériques une série de motifs permettant d'identifier des objets du monde qui nous entoure. Cette approche est dite ascendante (*bottom-up*, «du bas en haut»).

Dans les années 1980, les scientifiques ont trouvé d'ingénieuses méthodes ascendantes permettant à des ordinateurs de repérer des motifs porteurs de sens dans les données. Les systèmes «connexionnistes» ou «réseaux neuronaux» s'inspirent de la façon dont les neurones convertissent les motifs lumineux, formés au niveau de la rétine, en représentations du monde extérieur. Un réseau neuronal utilise des éléments de traitement interconnectés, analogues à des cellules biologiques, pour transformer les pixels fournis à une couche du

Créer un système logiciel qui apprend aussi bien qu'un enfant reste un défi pour l'informatique

réseau en représentations de plus en plus abstraites (un nez ou un visage entier, par exemple) à mesure que les données sont traitées dans des couches de niveau supérieur.

Les idées des réseaux neuronaux ont récemment connu un fort renouveau avec un ensemble de nouvelles techniques qualifiées d'«apprentissage profond». Cette renaissance a notamment été favorisée par la puissance croissante des ordinateurs et la disponibilité de très grandes masses de données. Avec de meilleures capacités de traitement et davantage de

L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE RENAÎT PAR DEUX VOIES

Des problèmes que des jeunes enfants d'environ 5 ans résolvent avec facilité peuvent mettre en échec les ordinateurs les plus puissants. Les performances des intelligences artificielles se sont cependant énormément améliorées ces dernières années.

La clé de cet essor réside dans des méthodes d'apprentissage automatique qui s'apparentent aux processus cognitifs mis en œuvre dans l'apprentissage des jeunes enfants.

Dans l'une des approches adoptées, la machine reconnaît par exemple la lettre A à partir d'information sensorielle brute ; c'est l'approche ascendante, du bas vers le haut.

Dans l'autre approche, la machine fait une hypothèse fondée sur des connaissances préexistantes (approche descendante, du haut vers le bas).

L'apprentissage des jeunes enfants semble combiner les avantages des deux approches.

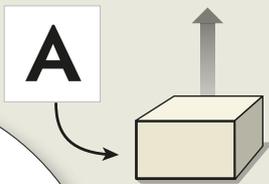
DES STRATÉGIES OPPOSÉES

APPROCHE ASCENDANTE (APPRENTISSAGE DISTRIBUÉ OU NEURONAL)

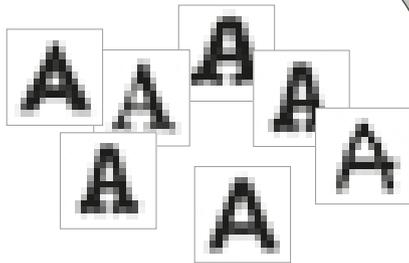
Des exemples de la lettre A apprennent à un ordinateur à distinguer les motifs de pixels clairs et foncés pour diverses versions de la lettre. Puis, quand la machine reçoit une nouvelle entrée, elle évalue si ces pixels correspondent à la configuration de la base d'apprentissage, auquel cas la lettre est reconnue comme un A. L'apprentissage profond est une version plus complexe de cette approche.

Sortie : Pixel par pixel, le motif d'entrée ressemble aux données brutes de la base d'apprentissage. C'est donc un A

Entrée



On entraîne le système avec des données brutes (c'est-à-dire des pixels)



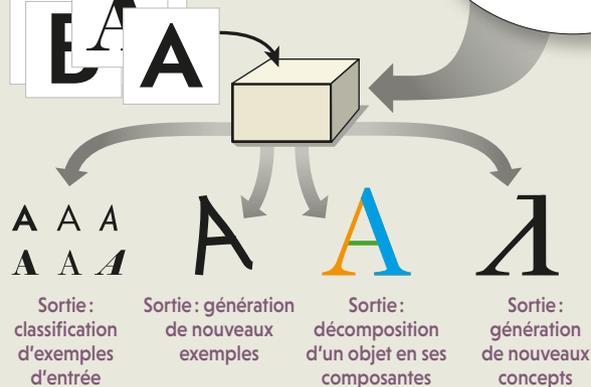
APPROCHE DESCENDANTE (MÉTHODES BAYÉSIENNES)

Un exemple unique de la lettre A suffit pour reconnaître des exemplaires similaires quand on utilise les méthodes bayésiennes. La machine construit un modèle de A à partir de sa propre bibliothèque interne de « pièces détachées » : un caractère constitué d'un angle aigu joint par une barre transversale. Ce modèle sert à identifier des versions légèrement différentes de la lettre ou à la modifier de diverses façons.

Le système est amorcé avec un seul exemple d'un nouveau concept, ce qui suffit pour tout un éventail de tâches



Entrée



Sortie : classification d'exemples d'entrée

Sortie : génération de nouveaux exemples

Sortie : décomposition d'un objet en ses composantes

Sortie : génération de nouveaux concepts

données à disposition, les systèmes connexionnistes parviennent à apprendre beaucoup plus efficacement qu'on ne l'avait envisagé jadis.

Au fil des années, les spécialistes de l'apprentissage des machines ont hésité entre donner la préférence à ces types de solutions ascendantes ou favoriser des approches descendantes. Ces dernières utilisent ce qu'un système sait déjà pour l'aider à apprendre quelque chose de nouveau. Platon, et à sa suite les philosophes rationalistes tels que René Descartes, croyait en une approche descendante (*top-down*, « de haut en bas ») de l'apprentissage, et cela a joué un rôle important aux débuts de l'intelligence artificielle. Dans les années 2000, ces méthodes ont également connu leur renaissance sous la forme de la modélisation probabiliste, ou bayésienne.

À l'instar des scientifiques, les systèmes descendants commencent par formuler des hypothèses abstraites et larges sur le monde.

Ils font ensuite des prédictions sur l'allure que devraient avoir les données si ces hypothèses sont correctes. Et comme des scientifiques, les systèmes révisent leurs hypothèses en fonction de l'écart entre les prédictions et les données réelles.

NIGERIA, VIAGRA ET SPAMS

Les méthodes ascendantes étant peut-être les plus faciles à comprendre, examinons-les en premier. Supposons que vous vous vouliez que votre ordinateur sépare les messages importants des spams qui arrivent dans votre messagerie électronique. Vous pourriez remarquer que les spams ont souvent des traits caractéristiques : une longue liste de destinataires, un expéditeur situé au Nigeria ou en Bulgarie, des références à des gains de un million de dollars ou au Viagra...

Cependant, des messages parfaitement légitimes ont parfois la même apparence. Si vous comparez un nombre suffisant de spams avec >

> d'autres types de courriels, vous remarquerez que seuls les spams tendent à présenter plusieurs de ces attributs à la fois: par exemple, le Nigeria et la promesse d'un gain de un million de dollars, voilà qui est louche. En fait, des motifs de niveau supérieur très subtils pourraient faire la différence entre les messages indésirables et les utiles: des fautes d'orthographe et des adresses IP non conformes, par exemple. Si vous pouviez les détecter, vous pourriez filtrer les messages indésirables avec précision, sans crainte d'écarter à tort la notification d'expédition de notre Viagra.



L'apprentissage ascendant peut dénicher les indices pertinents pour résoudre ce genre de tâche. Pour ce faire, un réseau neuronal doit passer en revue des millions d'exemples tirés de gigantesques bases de données, tous étiquetés soit «courriel indésirable», soit «message légitime». L'ordinateur extrait alors un ensemble de caractéristiques qui permettent de faire le tri entre les spams et le reste.

APPRENDRE À PARTIR DE MILLIONS D'EXEMPLES

De la même manière, le réseau pourrait inspecter des images tirées d'Internet et étiquetées «chat», «maison», «stégosaure», etc. En extrayant les caractéristiques communes de chaque ensemble d'images (le motif qui distingue tous les chats de tous les chiens), il peut identifier de nouvelles images de chat, même s'il n'a jamais vu ces images-là auparavant.

Une méthode ascendante, nommée apprentissage non supervisé, en est toujours à ses premiers balbutiements, mais elle permet de détecter des motifs dans des données sans aucune étiquette. Elle recherche simplement des groupes de propriétés qui identifient un objet; des yeux et un nez, par exemple, vont

toujours de pair pour former un visage et diffèrent des arbres et des montagnes de l'arrière-plan. L'identification d'un objet dans ces réseaux d'apprentissage profond avancés se fait par une division du travail dans laquelle les tâches de reconnaissance sont réparties entre différentes couches du réseau.

Un article paru en 2015 dans *Nature* montrait jusqu'où vont aujourd'hui les méthodes ascendantes. Des chercheurs de DeepMind, une filiale de Google, combinaient deux techniques ascendantes différentes (l'apprentissage profond et l'apprentissage «par renforcement») d'une manière qui permettait à un ordinateur de maîtriser les jeux vidéo pour console Atari 2600. Initialement, l'ordinateur ne connaissait rien du fonctionnement des jeux. Au début, il faisait des hypothèses aléatoires sur les meilleurs coups possible tout en recevant un retour permanent sur sa performance. L'apprentissage profond aidait le système à identifier les caractéristiques sur l'écran, et l'apprentissage par renforcement le récompensait pour un score élevé. L'ordinateur a atteint une bonne maîtrise sur plusieurs jeux, et dans certains cas il était plus performant que des joueurs humains experts. Cela dit, il échouait complètement sur d'autres jeux qui sont tout aussi faciles à maîtriser pour les humains.

La capacité à apprendre à partir de vastes jeux de données (des millions d'images Instagram, de courriels ou d'enregistrements vocaux) permet d'apporter des solutions à des problèmes qui semblaient auparavant insurmontables, tels que la reconnaissance vocale ou d'images. Cependant, il ne faut pas perdre de vue que mon petit-fils n'a aucune difficulté à reconnaître un animal ou à répondre à une demande orale, même avec des données et un entraînement beaucoup plus limités. Des problèmes simples pour un enfant de 5 ans restent extrêmement difficiles pour des ordinateurs, et beaucoup plus compliqués qu'apprendre à jouer aux échecs.

Les ordinateurs qui apprennent à reconnaître une tête à poils et à moustaches ont souvent besoin de millions d'exemples pour catégoriser les objets que nous savons classer à partir de quelques exemplaires. Après un entraînement intensif, l'ordinateur peut être capable d'identifier une image de chat qu'il n'a jamais vue auparavant. Mais il le fait de manière très différente des généralisations humaines. Parce que le logiciel raisonne différemment, il se produit des ratés. Certaines images de chat ne seront pas étiquetées comme étant des chats. Et l'ordinateur peut à tort classer une image dans la catégorie «chat» même s'il ne s'agit que d'une tache floue aléatoire, qui ne tromperait pas un instant un observateur humain.

L'autre approche de l'apprentissage qui a récemment transformé l'intelligence artificielle fonctionne dans le sens inverse, du haut vers le

bas. Elle part du principe que, si l'on peut obtenir une connaissance abstraite à partir de données concrètes, c'est parce que l'on sait déjà beaucoup de choses et, en particulier, parce que le cerveau comprend déjà des concepts abstraits fondamentaux. Comme des scientifiques, nous pouvons utiliser ces concepts pour formuler des hypothèses sur le monde et faire des prédictions sur l'allure que devraient avoir les données (les événements) si ces hypothèses sont vérifiées – le contraire d'essayer d'extraire des motifs à partir des données brutes elles-mêmes, comme on le fait dans l'approche ascendante.

APPROCHE DESCENDANTE

On peut illustrer parfaitement cette idée en revenant sur la plaie des spams avec un cas réel auquel j'ai été confrontée. J'ai reçu un courriel de l'éditeur d'une revue au nom étrange, faisant référence spécifiquement à l'un de mes articles et me proposant d'écrire un article pour le périodique en question. Pas de Nigeria, pas de Viagra, pas de million de dollars, le courriel ne présentait aucun des indices trahissant généralement un spam. Mais en utilisant ce que je savais déjà et en réfléchissant de manière abstraite au processus qui produit les messages indésirables, j'étais en mesure de juger suspect ce message.

Pour commencer, je sais que les spammeurs tentent d'extorquer de l'argent aux gens en faisant appel à la cupidité humaine, et les universitaires peuvent être aussi avides de publier que

exemple, et j'ai pu ensuite tester mon hypothèse en vérifiant l'authenticité de l'éditeur par une requête sur un moteur de recherche.

Un informaticien qualifierait mon raisonnement de «modèle génératif», c'est-à-dire un modèle capable de représenter des concepts abstraits. Ce même modèle peut également décrire le processus utilisé pour produire une hypothèse, le raisonnement qui a conduit à la conclusion que le message pouvait être un simple spam. Ce modèle me permet d'expliquer comment fonctionne cette forme de courriel indésirable, mais il me permet également d'imaginer d'autres formes de spams, ou même un type différent de tous ceux que j'ai déjà vus ou dont j'ai entendu parler. Quand je reçois le message de la revue, le modèle me permet de travailler à rebours, de retracer pas à pas pourquoi cela doit être du spam.

Les modèles génératifs occupaient une place primordiale dans la première vague de l'intelligence artificielle et des sciences cognitives, dans les années 1950 et 1960. Mais ils avaient aussi leurs limites. Tout d'abord, la plupart des motifs discriminants pourraient, en principe, être expliqués par de nombreuses hypothèses différentes. Dans mon cas, cela pourrait être que le courriel était vraiment légitime, même si cela semble improbable. Ainsi, les modèles génératifs doivent incorporer des notions probabilistes, ce qui est l'un des développements récents les plus importants pour ces méthodes. En second lieu, on ne sait pas bien d'où viennent les concepts fondamentaux qui charpentent les modèles génératifs. Des penseurs tels que Descartes et Noam Chomsky ont suggéré que nous naissons avec, mais vient-on vraiment au monde en sachant que la cupidité mène aux escroqueries?

Les modèles bayésiens (l'un des principaux exemples récents de méthode descendante) tentent de traiter les deux questions. Portant le nom du statisticien et philosophe anglais du XVIII^e siècle Thomas Bayes, ils intègrent la théorie des probabilités aux modèles génératifs à l'aide d'une technique appelée inférence bayésienne. Un modèle génératif probabiliste peut vous indiquer la probabilité de voir un motif spécifique dans les données si une hypothèse particulière est vraie. Si le courriel est un message indésirable, il s'adresse probablement à la cupidité du lecteur. Mais bien sûr, un message pourrait aussi éveiller la cupidité sans être indésirable. Un modèle bayésien combine la connaissance que vous avez déjà sur les hypothèses vraisemblables avec les données dont vous disposez pour vous permettre de calculer, avec une assez bonne précision, la probabilité que le courriel soit légitime ou indésirable.

Cette méthode descendante correspond mieux que son homologue ascendante à ce que nous savons des mécanismes d'apprentissage >

Les modèles bayésiens sont des modèles d'apprentissage qui calculent des probabilités

L'individu lambda sera avide de gagner un million de dollars ou d'améliorer ses performances sexuelles. Je sais aussi que des revues légitimes «en accès libre» ont commencé à couvrir leurs coûts en faisant payer les auteurs plutôt que les abonnés. De plus, mes travaux n'ont rien à voir avec le titre de la revue. En regroupant toutes ces informations, j'ai émis l'hypothèse plausible selon laquelle il s'agissait d'un spam visant à convaincre des universitaires de payer pour «publier» un article dans une fausse revue. J'ai pu tirer cette conclusion à partir d'un seul

> chez l'enfant. C'est pourquoi, depuis quinze ans, mes collègues et moi utilisons les modèles bayésiens dans nos travaux sur le développement des enfants. Notre laboratoire et d'autres ont utilisé ces techniques pour comprendre comment les enfants apprennent les relations de cause à effet, et prédire comment et quand les jeunes changent de point de vue sur une conviction erronée.

Les méthodes bayésiennes sont également une excellente manière d'apprendre aux machines à apprendre comme les humains. En 2015, Joshua Tenenbaum, du MIT (l'institut de technologie du Massachusetts), Brenden Lake, de l'université de New York, et leurs collègues ont publié une étude dans laquelle ils ont mis au point un système d'intelligence artificielle capable de reconnaître des caractères manuscrits inhabituels, une tâche simple pour les humains mais extrêmement ardue pour les ordinateurs.

Pensez un instant à vos propres capacités de reconnaissance. Même si vous n'avez jamais vu un caractère sur un rouleau japonais, vous saurez sans doute dire s'il s'agit du même ou d'un autre que sur le rouleau voisin. Vous saurez probablement le dessiner, et même concevoir un faux caractère japonais, et également comprendre que son allure est très différente de celle d'un caractère coréen ou russe. C'est exactement ce que le logiciel de l'équipe de Joshua Tenenbaum est parvenue à faire.

Dans une méthode ascendante, on présenterait à l'ordinateur des milliers d'exemples, et il utiliserait les motifs repérés dans ces exemples pour identifier les nouveaux caractères. Au lieu de cela, le programme bayésien a donné à la machine un modèle général de tracé de caractère: par exemple, une barre peut aller vers la droite ou vers la gauche. Et une fois que le logiciel a terminé un caractère, il passe au suivant.

Quand le programme voyait un caractère donné, il pouvait inférer la séquence de traits nécessaire pour le tracer, et pouvait ensuite produire lui-même un jeu de traits similaire. Il le faisait de la même manière que j'ai inféré la série d'étapes qui avait conduit à mon message douteux envoyé par la pseudorevue. Au lieu d'évaluer la probabilité que ce message soit une escroquerie, le modèle de Tenenbaum devinait si une séquence particulière de traits avait des chances de donner le caractère souhaité. Ce programme descendant fonctionnait bien mieux que l'apprentissage profond appliqué aux mêmes données exactement, et il reproduisait assez fidèlement les performances des humains.

Ces deux approches majeures de l'apprentissage machine, ascendante et descendante, ont des forces et des faiblesses complémentaires. Avec la méthode ascendante, l'ordinateur n'a pas besoin d'avoir au départ la moindre compréhension de ce qu'est un chat, mais il a besoin de beaucoup de données. Le système bayésien, quant à lui, est capable d'apprendre à

partir de quelques exemples seulement, et il peut faire des généralisations plus larges. En revanche, cette approche descendante nécessite beaucoup de travail en amont pour articuler le bon jeu d'hypothèses. Et les concepteurs des deux types de systèmes peuvent rencontrer des obstacles similaires. L'une et l'autre approches ne fonctionnent que sur des problèmes relativement étroits et bien définis, comme la reconnaissance de caractères écrits ou de chats, ou les jeux sur console Atari.

LES ENFANTS EXPLOITENT LE MEILLEUR DES DEUX APPROCHES

Les enfants ne sont pas soumis aux mêmes contraintes. Les psychologues du développement ont trouvé que les jeunes combinent les meilleures qualités de chaque approche, ce qui les emmène beaucoup plus loin. Augie peut apprendre juste à partir d'un ou deux exemples, à la manière d'un système descendant. Mais il extrait aussi des corrélations à partir des données elles-mêmes, comme un système ascendant, et en déduit ainsi certaines idées qui n'étaient pas présentes initialement.

Augie a bien d'autres cordes à son arc. Il reconnaît immédiatement les chats et distingue les lettres, mais il peut également faire de nouvelles inférences créatives et étonnantes qui vont bien au-delà de son expérience ou de ses connaissances préalables. Il a récemment expliqué que si un adulte veut redevenir un enfant, il devrait essayer de ne pas manger de légumes sains, puisque ce sont eux qui font qu'un enfant grandit et devient adulte. Nous n'avons pratiquement aucune idée de la manière dont ce type de raisonnement créatif émerge.

Nous devrions nous rappeler les pouvoirs encore mystérieux de l'esprit humain quand nous entendons certains affirmer que l'intelligence artificielle est une menace existentielle. Intelligence artificielle et apprentissage automatique sont des termes qui font peur. Et à certains égards, cela est justifié – la recherche militaire travaille à utiliser ces systèmes pour commander des armes, par exemple.

Mais la stupidité naturelle peut faire plus de dégâts que l'intelligence artificielle, et nous autres humains devons faire preuve de beaucoup plus d'intelligence que nous avons pu le faire par le passé afin d'encadrer correctement ces nouvelles technologies. Même si les progrès de l'informatique résultent de l'augmentation de la puissance de calcul et des masses de données disponibles, plutôt que de révolutions conceptuelles dans notre compréhension de l'esprit, ils n'en peuvent pas moins avoir des conséquences pratiques capitales. Cela dit, nous n'avons pas de raisons de penser qu'un nouveau golem technologique est sur le point d'être lâché sur le monde. ■

BIBLIOGRAPHIE

Y. Bengio, **La révolution de l'apprentissage profond**, *Pour la Science* n° 465, juillet 2016.

A. Gopnik, **The Gardener and the Carpenter - What the new science of child development tells us about the relationship between parents and children**, Farrar, Straus and Giroux, 2016.

M. L. Brenden et al., **Human-level concept learning through probabilistic program induction**, *Science*, vol. 350, pp. 1332-1338, 2015.

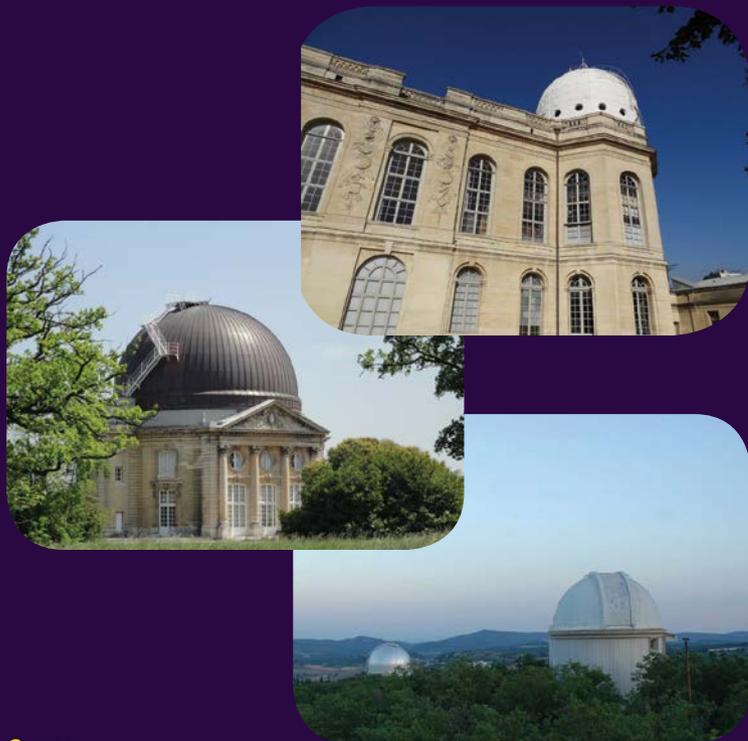
A. Gopnik et al., **Bayesian networks, Bayesian learning and cognitive development**, *Developmental Science*, vol. 10(3), pp. 281-287, 2007.

OBSERVATOIRE DE PARIS

DIPLÔME D'UNIVERSITÉ

EN PRÉSENTIEL ET À DISTANCE

“EXPLORER ET COMPRENDRE L'UNIVERS”



Objectifs

L'Observatoire de Paris propose la préparation d'un diplôme d'Université permettant d'acquérir un panorama des connaissances actuelles et des recherches en cours en astronomie et en astrophysique auprès d'astronomes professionnels.

Publics concernés

Ces cours s'adressent à toutes les personnes passionnées d'astronomie et de niveau baccalauréat scientifique ou équivalent.

Les étudiants inscrits à l'université dans le cadre du LMD peuvent valider en ECTS sous réserve d'accord avec leur responsable pédagogique.

Contenu

Cette formation, de niveau L1, peut être suivie en présentiel et à distance sous forme de cours le mardi soir de 17h à 20h à l'Observatoire de Paris ou de cours filmés en différé.

Un stage pratique de traitement de données a lieu en mars à l'Observatoire de Meudon (en option et sous conditions ; nombre de places limité).

Un stage facultatif de 4 nuits d'observation a lieu l'été à l'Observatoire de Haute-Provence (en option et sous conditions ; nombre de places limité).

Les sujets abordés sont les suivants :

- ▶ Mécanique céleste et astrométrie
- ▶ Histoire de l'astronomie
- ▶ Ondes et instruments
- ▶ Le soleil
- ▶ Planétologie comparée
- ▶ Traitement de données
- ▶ Étoiles et milieu interstellaire
- ▶ Galaxies
- ▶ Cosmologie



Inscriptions

Dossiers à déposer avant le 8 septembre sur le site d'inscription en ligne : https://ufe.obspm.fr/candidatures_ufe

Renseignements

<http://ufe.obspm.fr/Diplomes-d-Universite/DU-en-presentiel>

contact.duecu@obspm.fr

Téléphone : 01.45.07.78.87

L'ESSENTIEL

> L'étoile KIC 8462852, surnommée l'étoile de Tabby, est un astre dont le comportement étrange a été découvert grâce au télescope spatial *Kepler*.

> Les baisses de luminosité de cette étoile, aussi spectaculaires que sporadiques, sont difficiles à expliquer par des processus naturels connus.

> Disques de gaz et de poussière, débris interstellaires, essaims de comètes ou même trous noirs sont autant d'explications exotiques envisagées.

> Une idée extravagante a aussi été proposée : le comportement bizarre de l'étoile traduirait l'activité d'une civilisation extraterrestre avancée.

LES AUTEURS



KIMBERLY CARTIER
doctorante
en astrophysique
à l'université d'État
de Pennsylvanie,
aux États-Unis



JASON WRIGHT
maître de conférences
en astronomie
et astrophysique
à l'université d'État
de Pennsylvanie

L'étrange étoile de Tabby

UNE LOINTAINE ÉTOILE BRILLE AVEC UNE INTENSITÉ QUI FLUCTUE MYSTÉRIEUSEMENT. DE LÀ À SUPPOSER QU'UNE CIVILISATION EXTRATERRESTRE A ENTOURÉ L'ASTRE D'IMMENSES CAPTEURS POUR EXPLOITER SON RAYONNEMENT...

Par une calme après-midi d'automne, en 2014, alors que les arbres viraient du vert à l'or, Tabetha Boyajian nous a rendu visite au département d'astronomie pour partager une découverte inhabituelle. Une rencontre qui allait changer le cours de nos carrières.

Grâce aux données du télescope spatial *Kepler*, Tabetha (ou Tabby) Boyajian, alors postdoctorante à l'université Yale, étudiait d'inexplicables fluctuations lumineuses en provenance d'une étoile distante de 1280 années-lumière. Le télescope *Kepler*, spécialisé dans la recherche d'exoplanètes – planètes en orbite autour d'autres étoiles que le Soleil –, mesure les variations de luminosité que l'exoplanète provoque en passant entre l'étoile et le télescope. Or les fluctuations qui intriguaient l'astronome ne ressemblaient à rien de ce qu'une exoplanète est susceptible d'occasionner. Et la chercheuse de Yale avait déjà exclu d'autres explications sans avoir trouvé de solution satisfaisante.

Elle cherchait de nouvelles idées, et l'un d'entre nous (Jason Wright) a suggéré quelque chose de très peu orthodoxe : peut-être les changements de luminosité de l'étoile ne découlent-ils pas de processus naturels, mais d'une technologie extraterrestre ? Dans les années 1960, le physicien Freeman Dyson avait imaginé que des civilisations avancées gourmandes en énergie seraient capables d'envelopper leur étoile mère de collecteurs solaires (et former ce qu'on nomme une sphère de Dyson) pour absorber le maximum d'énergie rayonnée par l'astre. Se pourrait-il que cette étoile pâlisante soit le premier signe que l'existence d'autres cultures cosmiques ne relève pas simplement de la science-fiction ? Cette idée outrancière était une hypothèse proposée comme dernier recours, mais, dans l'immédiat, il ne nous était pas possible de l'écarter.

L'étoile qui déconcertait Tabetha Boyajian (désormais nommée étoile de Boyajian et familièrement appelée étoile de Tabby) captive à présent de nombreux astronomes ainsi que le >



SPHÈRE DE DYSON

L'hypothétique sphère de Dyson désigne un ensemble de capteurs gigantesques mis en place autour d'une étoile pour absorber un maximum de son rayonnement. Un tel dispositif en cours de construction par une civilisation extraterrestre avancée technologiquement ferait varier la luminosité de l'astre de façon inexplicable, comme c'est le cas avec l'étoile de Tabby.

> grand public. Comme toutes les grandes énigmes, elle a suscité un nombre important de tentatives de solution, dont aucune n'est parvenue à expliquer complètement les étranges observations. L'explication sort peut-être du domaine des phénomènes astrophysiques connus.

ENFOUIE DANS LE TRÉSOR DE KEPLER

Avant le lancement de *Kepler* en 2009, la chasse aux exoplanètes était laborieuse. Les astronomes les trouvaient une à la fois, comme des pêcheurs à la ligne sortant des poissons isolés de la mer. Quand *Kepler* est arrivé, c'était en quelque sorte un chalutier de l'espace, qui attrapait les nouvelles planètes par milliers.

Pendant quatre années, le télescope a observé en continu les étoiles d'une petite région de la Voie lactée. Il était à l'affût de «transits» planétaires, situations où une planète passe devant son étoile et s'interpose entre elle et nous, ce qui bloque une fraction de la lumière stellaire vue depuis la Terre. Représentée en fonction du temps, la luminosité de l'étoile décrit ce qu'on nomme une courbe de lumière. Sans transit de planète, cette courbe est plus ou moins une ligne plate. Mais avec une planète en transit, cette courbe de lumière présente des creux en forme de U qui se répètent à intervalles réguliers, à chaque fois que le corps en orbite effectue un tour complet et repasse devant l'étoile (voir la figure ci-contre). Les chercheurs savent extraire des informations sur la planète (taille, température) à partir de la durée, l'espacement et la profondeur des creux.

Parmi les plus de 150 000 étoiles que *Kepler* a scrutées, une seule (KIC 8462852, son numéro dans le *Kepler Input Catalog*) présentait une courbe de lumière qui défiait toute explication. Les membres du projet scientifique participatif *Planet Hunters* ont été les premiers à le remarquer en parcourant les données de *Kepler* à la recherche d'éventuelles planètes en transit qu'auraient laissé passer les algorithmes automatiques des astronomes professionnels. KIC 8462852 présentait des creux de type transit, mais apparemment aléatoires, certains ne durant que quelques heures et d'autres persistant plusieurs jours, voire semaines. Parfois, la lumière de l'étoile était atténuée d'environ 1 % (ce qui est caractéristique des transits des plus grosses exoplanètes), mais d'autres fois l'atténuation atteignait 20 % (voir l'encadré de la page ci-contre). Aucun système planétaire concevable ne pouvait produire une courbe de lumière présentant une variabilité aussi extrême.

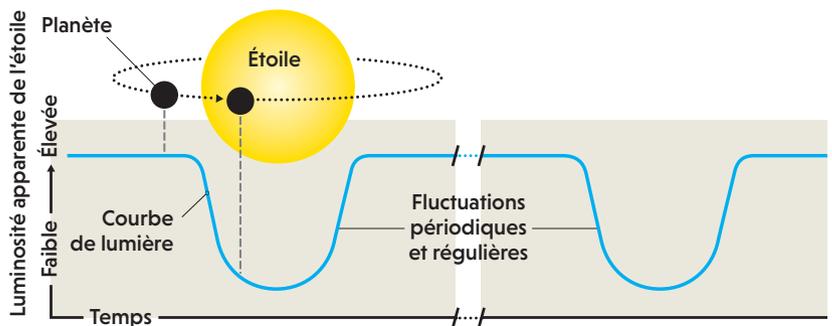
Perplexes, les membres de *Planet Hunters* ont signalé leur trouvaille à Tabetha Boyajian, qui chapeaute le projet. En 2016, ils ont présenté l'étoile et ses mystères dans un article

UNE COURBE DE LUMIÈRE ÉNIGMATIQUE

Pour les astronomes, l'atténuation de l'éclat d'une étoile n'est généralement pas mystérieuse. Des taches stellaires, ainsi que l'ombre de planètes ou de disques de débris, font régulièrement pâler des étoiles adultes dont la luminosité est, sinon, stable (voir ci-dessous). Mais aucune de ces explications ne semble s'appliquer à l'étoile de Tabby (voir page ci-contre).

1. COURBE DE LUMIÈRE TYPIQUE

La « courbe de lumière » représente la luminosité de l'étoile en fonction du temps. Une planète qui passe devant l'astre bloque une partie de la lumière émise dans notre direction et se traduit par un creux dans la courbe. Ce creux se reproduit à chaque révolution. Les taches stellaires créent des motifs dans la courbe de lumière qui dépendent de la vitesse de rotation de l'étoile et de son cycle d'activité. Elles peuvent donc être identifiées.



portant le sous-titre «Where's the flux?» (jeu de mots avec l'abréviation WTF de l'expression vulgaire «what the fuck?»).

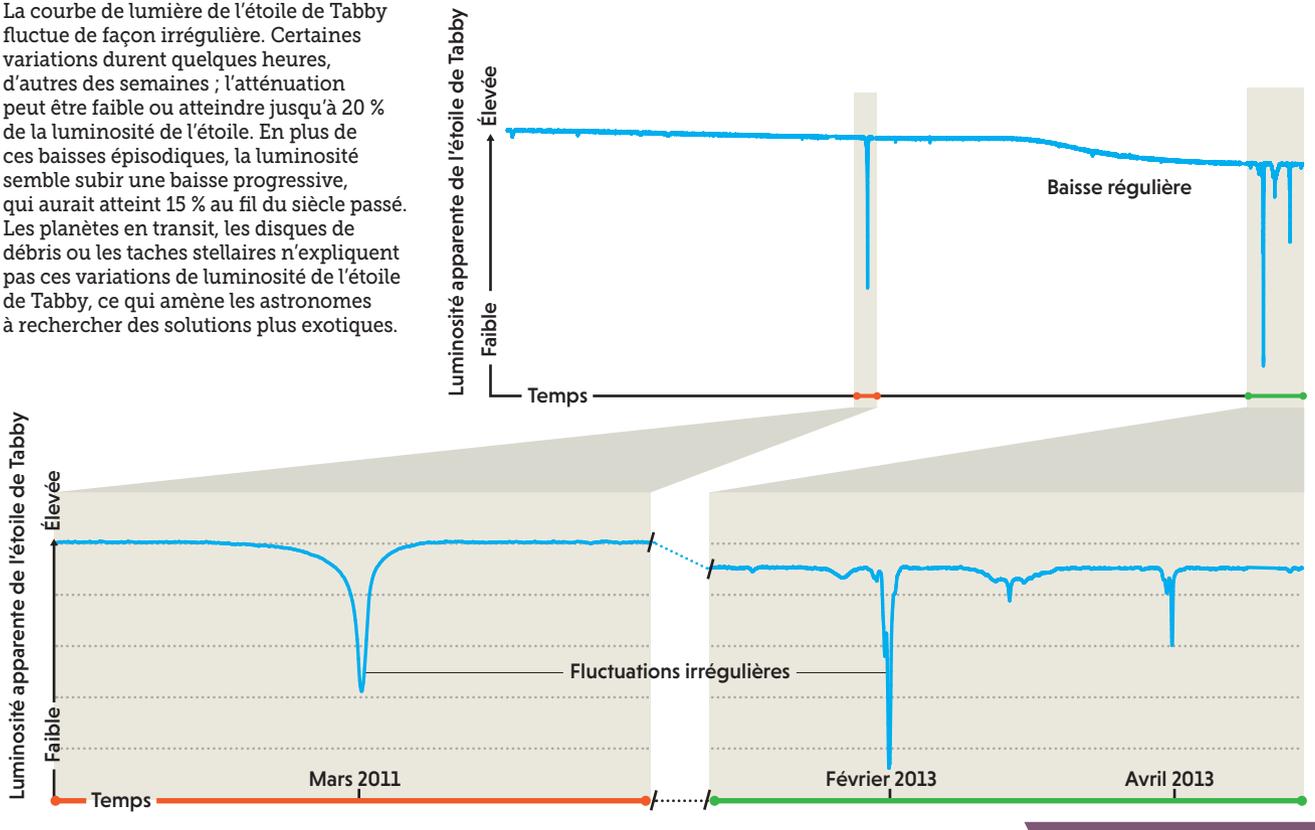
ÉTRANGE À PLUS D'UN TITRE

L'étoile de Tabby réservait une autre surprise. Dans le sillage de l'article WTF, l'astronome Bradley Schaefer, de l'université d'État de Louisiane, a affirmé, sur la base de données d'archives, que la luminosité de l'étoile de Tabby aurait globalement baissé de plus de 15 % en l'espace d'un siècle.

Cette affirmation a été très contestée, car une telle atténuation en quelques décennies semble pratiquement impossible à expliquer. Les étoiles conservent la même luminosité ou presque pendant des milliards d'années après leur naissance, et ne commencent à subir des changements accélérés que juste avant leur mort. Ces changements «rapides» ont en réalité lieu à des échelles de millions (plutôt que de milliards) d'années, et sont accompagnés de marqueurs clairs qui ne sont pas présents dans le cas de l'étoile de Tabby. D'après toutes les autres mesures réalisées, il s'agit d'une étoile banale et d'âge moyen. Rien ne laisse penser que ce serait une étoile variable, astre qui pulse à un rythme régulier. Il n'y a aucune indication qu'elle accréterait de la matière d'une étoile

2. L'ATYPIQUE ÉTOILE DE TABBYY

La courbe de lumière de l'étoile de Tabby fluctue de façon irrégulière. Certaines variations durent quelques heures, d'autres des semaines ; l'atténuation peut être faible ou atteindre jusqu'à 20 % de la luminosité de l'étoile. En plus de ces baisses épisodiques, la luminosité semble subir une baisse progressive, qui aurait atteint 15 % au fil du siècle passé. Les planètes en transit, les disques de débris ou les taches stellaires n'expliquent pas ces variations de luminosité de l'étoile de Tabby, ce qui amène les astronomes à rechercher des solutions plus exotiques.



compagnon, aucun signe d'activité magnétique anormale et aucune raison de penser qu'elle pourrait être jeune et encore en formation, autant de situations qui justifieraient une modification rapide de luminosité. En fait, à part cette atténuation anormale de la luminosité, cette étoile semble parfaitement ordinaire.

L'affirmation de Bradley Schaefer est aussi soutenue par l'analyse des astronomes Benjamin Montet et Joshua Simon portant sur les données de calibration originales de *Kepler*. Ils ont trouvé que l'étoile de Tabby avait faibli d'environ 3 % sur les quatre années de la mission *Kepler*. Cet effet de long terme est aussi extraordinaire que les décrochements de courts termes.

PAS DE CANDIDAT PARFAIT

Il nous faut donc expliquer deux phénomènes qui défient l'entendement concernant l'étoile de Tabby : une lente diminution de luminosité sur au moins quatre ans (et peut-être tout le siècle dernier) et de nets décrochements irréguliers qui durent plusieurs jours, voire des semaines. Les astronomes préféreraient une explication rendant compte des deux phénomènes à la fois, mais force est de reconnaître que chacun est déjà difficile à expliquer séparément.

Parmi les nombreuses hypothèses avancées, nous avons sélectionné les six scénarios le plus souvent cités pour expliquer le comportement bizarre de l'étoile de Tabby. Nous présentons les arguments qui soutiennent ces idées, mais aussi leurs points faibles. Ces scénarios reposent parfois sur des idées assez spéculatives. Il y a donc une part assez subjective dans l'appréciation des scénarios proposés, selon que l'on juge ces idées plausibles ou non. Néanmoins, il est enrichissant de garder en tête toutes ces idées, et un œil critique, dans l'attente d'observations et de données supplémentaires sur cette curieuse étoile.



1. UN DISQUE DE POUSSIÈRE ET DE GAZ

Les décrochements irréguliers et l'atténuation lumineuse à long terme de l'étoile de Tabby s'observent ailleurs : autour de très jeunes étoiles ayant des planètes en formation. Une telle étoile est ceinturée d'un disque de gaz et de poussière, que l'astre chauffe. Lorsque des planètes s'y forment, des grumeaux et des anneaux s'y développent et le disque subit même des déformations. Dans les disques que nous voyons par la tranche, ces traits peuvent brièvement atténuer la luminosité de l'étoile. ➤

> Et des disques circumstellaires déformés peuvent arrêter une fraction croissante de la lumière de l'étoile sur des échelles de temps de l'ordre de la décennie ou du siècle.

Mais l'étoile de Tabby est d'âge moyen, et non jeune, et apparemment dépourvue d'un disque. D'ailleurs, si ce disque était présent, nous devrions détecter sa présence par des émissions électromagnétiques spécifiques. Il serait chauffé par le rayonnement de l'étoile et, comme tout objet chaud, il devrait émettre un rayonnement infrarouge. Or on n'observe rien de tel avec l'étoile de Tabby. Peut-être l'anneau de poussière et de gaz est-il très mince et très étalé autour de l'étoile, auquel cas il bloquerait la lumière le long de notre ligne de visée sans donner lieu à un excès d'infrarouge notable. Mais de tels anneaux n'ont jamais été vus autour d'étoiles d'âge moyen comme celle de Tabby. Comme ce scénario ne peut expliquer l'étoile de Tabby qu'en invoquant un phénomène jamais observé auparavant, nous pensons qu'il est très improbable.



2. UN ESSAIM DE COMÈTES

Selon l'une des premières hypothèses de Tabettha Boyajian, des essaims de comètes géantes étaient à l'origine des baisses de luminosité de l'étoile. Les comètes, après tout, passent l'essentiel de leur temps loin de leur étoile et ont des orbites très excentriques, ce qui rendrait compte de l'irrégularité des baisses lumineuses. Cependant, comme dans le cas du disque de poussière, le rayonnement absorbé par les comètes les chaufferait, ce qui se traduirait par une signature infrarouge. Toutefois, la non-détection de ce rayonnement n'est pas aussi critique pour ce scénario. En effet, les comètes se réchauffent rapidement en s'approchant de leur étoile, mais se refroidissent tout aussi vite en s'en éloignant. Ainsi, presque tout le rayonnement infrarouge serait émis pendant le décrochement. Le surplus de rayonnement infrarouge serait difficile à séparer de la lumière de l'étoile. Ensuite, les comètes s'éloigneraient, déjà refroidies, et n'émettraient pas de chaleur détectable. Plus délicat : un essaim capable d'entraîner la mystérieuse atténuation à long terme devrait être très grand, ce qui ne manquerait pas de créer un excès d'infrarouge observable.

Ainsi, notre verdict est que l'explication par les comètes est plausible pour les décrochements ponctuels, les contraintes sur les émissions infrarouges étant moins sévères que dans le cas d'un disque. Mais il est beaucoup moins probable que les comètes expliquent le déclin lumineux à long terme. En fin de compte, il est difficile de penser que ce scénario explique le comportement de l'étoile de Tabby.

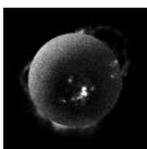


3. UN NUAGE DANS LE MILIEU INTERSTELLAIRE OU DANS LE SYSTÈME SOLAIRE

L'espace interstellaire est parsemé de nuages de gaz et de poussière qui absorbent la lumière des étoiles situées en arrière-plan. Peut-être un tel nuage bloque-t-il une fraction variable de la lumière en fonction de la partie traversée par la ligne de visée de *Kepler* au cours de l'orbite du télescope autour du Soleil. Ce nuage ne serait pas homogène. Dès lors, les variations de densité expliqueraient la baisse régulière de la luminosité apparente de l'étoile sur de longues périodes, avec des concentrations ponctuelles de matière qui entraîneraient les brèves atténuations extrêmes.

Valeri Makarov, de l'Observatoire naval des États-Unis, et son collègue Alexey Goldin ont proposé une autre explication pour les petites fluctuations, où la baisse de luminosité est inférieure à 7%. Ils suggèrent qu'il existe une autre étoile dans l'alignement de l'étoile de Tabby. Les petites baisses correspondraient à des occultations par des essaims de minuscules nuages denses ou de comètes dans l'espace interstellaire de cette étoile. Cette hypothèse est plausible.

Toujours dans l'idée d'un nuage de matière, ce dernier pourrait se situer à la périphérie du Système solaire. Dans ce cas, l'orbite de *Kepler* autour du Soleil ferait traverser à la ligne de visée du satellite ce même nuage tous les ans, mais nous ne voyons pas de répétition annuelle des baisses de luminosité de l'étoile de Tabby. De plus, nous n'avons pas d'autres indices de l'existence de ce nuage, ni de son origine possible. Nous pourrions imaginer un nuage de glace et de vapeur produit par des geysers sur un corps de type Pluton beaucoup plus éloigné du Soleil. Les planétologues n'ont pas encore d'éléments pour appuyer cette piste, que nous jugeons concevable mais peu probable.



4. DES VARIATIONS STELLAIRES INTRINSÈQUES

L'éclat des étoiles change quand elles commencent à épuiser les réserves de combustible en leur cœur. Mais cela se produit à des échelles de millions d'années, et pas de siècles ou de jours, et cela à la fin de la vie de l'étoile, pas au milieu. En revanche, des phénomènes naturels tels que des taches stellaires ou des éruptions, que l'on observe aussi sur le Soleil, modifient l'éclat des étoiles à des échelles temporelles plus courtes. Nous n'aurions, *a priori*, plus besoin d'invoquer des nuages de gaz et des comètes si les décrochements irréguliers sont expliqués par des variations d'éclat résultant de processus physiques internes à l'étoile de Tabby.

TABBY, UNE ÉTOILE POURTANT ORDINAIRE

TYPE D'ÉTOILE

Étoile jaune-blanc de la séquence principale

DISTANCE

1 280 années-lumière (dans la constellation du Cygne)

MASSE

1,43 masse solaire

RAYON

1,58 rayon solaire

TEMPÉRATURE

6 750 kelvins (environ 6 500 °C)

MAGNITUDE APPARENTE

11,7 (invisible à l'œil nu)

Récemment, Mohammed Sheikh et ses collègues, de l'université de l'Illinois à Urbana-Champaign, ont effectué une analyse statistique des temps caractéristiques, des profondeurs et des durées des baisses de luminosité à court terme. Ils ont trouvé une distribution en «loi de puissance» caractéristique d'une transition de phase continue (comme lorsque des aimants se réalignent en présence de champs magnétiques externes). Selon eux, cette distribution suggère que les baisses de luminosité de l'étoile



5. TROUS NOIRS

Dans le grand public, certains ont imaginé la possible implication d'un trou noir. Selon une idée assez répandue, un trou noir de masse

stellaire en orbite rapprochée autour de l'étoile de Tabby pourrait en bloquer la lumière. Mais cette hypothèse souffre de trois failles. Tout d'abord, un tel trou noir tirerait l'étoile tantôt dans un sens, tantôt dans un autre, créant un mouvement oscillant facilement détectable, que l'équipe de Tabettha Boyajian a recherché en vain. Ensuite, les trous noirs de masse stellaire sont beaucoup plus petits que les étoiles, si bien qu'un trou noir n'arrêterait qu'une infime fraction de la lumière stellaire. En fait, le champ gravitationnel intense d'un trou noir, contrairement à l'intuition, aurait pour effet d'amplifier la brillance de l'étoile, en focalisant la lumière par un effet de lentille gravitationnelle. Et, dernière faille, quand du gaz et de la poussière tombent dans un trou noir, la matière est soumise à de formidables frottements qui la chauffent. Elle émet alors fortement à toutes les longueurs d'onde. S'il y avait vraiment un trou noir en orbite autour de l'étoile de Tabby, nous devrions nous attendre à une augmentation, et non à une diminution, de la luminosité, ce qui n'est clairement pas le cas.

Pas de trou noir, donc? Ce n'est pas si simple. Nous venons d'expliquer pourquoi le trou noir ne peut être proche de l'étoile de Tabby. Mais il pourrait être plus lointain, à la dérive quelque part entre l'étoile de Tabby et nous. Imaginez un tel trou noir ayant en orbite autour de lui un grand disque froid de matière, comme les anneaux de Saturne, mais plus grand que le Système solaire entier. Ce disque pourrait présenter une région externe presque transparente et une région interne plus dense. Un tel disque entraînerait le déclin à long terme de l'étoile de Boyajian en occultant sa lumière d'abord avec sa région presque transparente, puis avec sa région interne dense, une dérive à travers notre ligne de visée qui pourrait prendre au moins cent ans. Les décrochements lumineux irréguliers de l'étoile pourraient alors être les ombres projetées par les sous-structures du disque en transit. Un tel trou noir (et son hypothétique disque) aurait échappé aux mesures d'imagerie à haute résolution de Tabettha Boyajian parce qu'il n'émettrait lui-même aucune lumière.

Comme nous n'avons pas de preuves observationnelles que certains trous noirs s'accompagnent de disques froids étalés, ce scénario semble un peu tiré par les cheveux. Mais les théoriciens prédisent l'existence de tels disques en tant que sous-produits des supernovæ qui donnent naissance à des trous noirs de masse stellaire. De plus, les chercheurs ont estimé que >

Chaque scénario a son lot de spéculations et d'hypothèses qu'il reste à démontrer

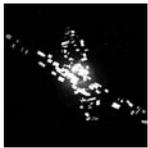
de Tabby sont dues à sa situation au seuil d'une transition interne, telle qu'une inversion globale de son champ magnétique.

Mais aucune étoile du type de celle de Tabby n'a jamais présenté une telle activité. En fait, l'étoile est trop chaude pour avoir le type de dynamo stellaire qui engendre des effets magnétiques au sein d'étoiles plus froides, telles que le Soleil. Plus problématique encore, les champs magnétiques stellaires ne pourraient pas être responsables du déclin lumineux à long terme que nous observons.

L'astronome Brian Metzger, de l'université Columbia, et ses collègues ont avancé une explication peut-être plus simple. Une planète ou une naine brune serait entrée en collision avec l'étoile de Tabby. La collision aurait entraîné une augmentation temporaire de la luminosité de l'étoile, et le déclin lumineux à long terme que nous observons correspondrait alors au retour à la normale de l'étoile. Ce scénario n'explique pas les baisses ponctuelles irrégulières ou la forme précise de l'obscurcissement à long terme vu par Benjamin Montet et Joshua Simon dans les données de calibration de *Kepler*, mais de futures études, plus détaillées, apporteront peut-être des arguments en sa faveur.

Pour ces raisons, nous pensons que le scénario de la fusion est intéressant, mais demande à être examiné plus précisément. Les autres explications nous semblent plus improbables.

> les chances sont non nulles qu'un tel trou noir doté d'un disque soit passé devant au moins une des 150 000 étoiles suivies par *Kepler* au cours de ses quatre années de relevé. Ce scénario est donc assez raisonnable.



6. DES MÉGASTRUCTURES EXTRATERRESTRES

Jusqu'à présent nous avons considéré des scénarios qui reposaient sur des explications naturelles. Aucune ne se détache particulièrement, chacune ayant son lot de spéculations, d'hypothèses qui restent à démontrer, etc. Ainsi, à ce stade, rien ne nous interdit d'envisager une explication plus sensationnelle : une mégastructure extraterrestre, dans la veine de celle que décrivait Freeman Dyson il y a plus d'un demi-siècle.

Imaginez qu'une civilisation extraterrestre ait construit un grand nombre de panneaux collecteurs d'énergie et que ces panneaux aient tout un éventail de tailles et d'orbites autour de l'étoile. L'effet combiné des panneaux de l'essaim serait de bloquer une fraction de la lumière de l'étoile.

Quand des parties plus denses de l'essaim entrent ou sortent de notre ligne de visée, nous verrions des variations de luminosité sur des durées allant de quelques heures pour les unes ou plusieurs siècles pour les autres. Comme l'a noté il y a plus d'une décennie l'astronome Luc Arnold, des panneaux ou des groupes de panneaux particulièrement grands volant en formation (peut-être même plus grands que l'astre lui-même) entraîneraient d'énormes baisses discontinues de luminosité liées à leur forme géométrique au moment des transits.

Comme pour l'hypothèse du disque circumstellaire, le manque d'émission infrarouge est encore un problème. Même les mégastructures extraterrestres doivent obéir aux lois fondamentales de la physique, et donc toute énergie de l'étoile qu'elles interceptent doit *in fine* être rayonnée sous forme de chaleur. Cette exigence reste valable quelle que soit l'efficacité énergétique de leur technologie : l'énergie ne peut pas être détruite, et si elles en recueillent beaucoup, elles doivent également en perdre beaucoup à plus ou moins long terme. La signature infrarouge semble inévitable.

Il y a néanmoins des manières de rendre l'hypothèse tenable : une mégastructure sous forme d'essaim pourrait convertir l'énergie recueillie sous forme de signaux radio ou laser au lieu de chaleur ; elle pourrait ne pas former un essaim sphérique, mais un anneau aligné précisément avec notre ligne de visée, et les émissions seraient alors dirigées dans une direction qui échappe à nos détecteurs ; elle pourrait utiliser une technologie échappant à notre compréhension de la physique et n'émettant aucune

RENDEZ-VOUS EN 2021 ?

L'étoile de Tabby continue à se comporter de façon étonnante. Le 19 mai 2017, les astronomes ont observé une nouvelle chute de sa luminosité. Les chercheurs ont suivi en direct ce décrochement qui a duré cinq jours avant le retour à la normale. La baisse était de 2,5 % par rapport à la luminosité d'avant le 19 mai. C'est la première baisse épisodique observée depuis les résultats obtenus par *Kepler* entre 2011 et 2013. Une autre baisse a suivi en juin.

chaleur. À cause de la multitude d'inconnues, ce scénario est très difficile à tester.

L'idée des mégastructures extraterrestres serait donc à considérer sérieusement si toutes les hypothèses naturelles sont écartées. À l'inverse, elle serait étayée si nous détectons des signaux radio clairement artificiels émis depuis le voisinage de l'étoile de Tabby, une recherche que nous avons entamée avec Tabet Boyajian à l'aide du télescope de Green Bank, en Virginie-Occidentale, aux États-Unis. Pour l'instant, il est difficile de se prononcer sur cette hypothèse extravagante : nous n'en savons tout simplement pas assez pour estimer, même grossièrement, la probabilité des capacités techniques d'une hypothétique vie extraterrestre.

UN AVENIR INCONNU MAIS RADIEUX

Quel bilan tirer de toutes ces tentatives pour expliquer le comportement de l'étoile de Tabby ? Nous pouvons exclure toute explication qui conduit à un excédent naturel d'énergie infrarouge, puisque nous n'en observons pas. Nous pouvons aussi rejeter des scénarios qui font intervenir de nombreux événements peu probables, ou qui invoquent une physique ou des objets que nous n'avons jamais vus auparavant, au moins jusqu'à ce que toutes les autres options aient été éliminées.

Le meilleur moyen d'avancer est de récolter davantage d'informations sur l'étoile. En 2013, *Kepler* a cessé de prendre des données, à la suite

Grâce à un réseau d'observatoires, les données ont été enregistrées dans différentes gammes du spectre, notamment dans l'infrarouge, une gamme de fréquences cruciale pour tester certaines idées. Ces données sont en cours d'analyse et il est encore trop tôt pour conclure.

Quelques jours après ces observations, un nouveau scénario a été proposé par Fernando Ballesteros, de l'université de Valence, en Espagne, et ses collègues. L'hypothèse est qu'une planète entourée d'un anneau et en orbite autour de Tabby aurait produit le décrochement observé en 2011. Cette planète serait accompagnée d'astéroïdes troyens, c'est-à-dire des corps qui occupent deux régions gravitationnellement stables sur l'orbite de la planète (les points de Lagrange à 60° en avance et en retard sur la planète, comme les Troyens de Jupiter). Les perturbations de 2013 correspondraient aux Troyens qui suivent la planète. Les chercheurs anticipent donc une future baisse en 2021, lorsque les Troyens qui devancent la planète reviendront dans notre ligne de mire. Quant à la baisse de mai dernier, elle correspondrait au passage du point de Lagrange exactement à l'opposé de la planète par rapport à son étoile. Il pourrait aussi être occupé par quelques astéroïdes de passage.

de problèmes techniques de stabilisation du satellite. Tabetha Boyajian, aujourd'hui maître de conférences à l'université d'État de Louisiane, a mobilisé le grand public avec une campagne de financement participatif. Nous avons pu acheter du temps sur le Réseau mondial de télescopes de l'observatoire de Las Cumbres, situé en Californie et géré par une fondation privée à but non lucratif. Nous suivons l'étoile plusieurs fois par jour et, si sa lumière baisse à nouveau, nous avons plusieurs télescopes prêts à entrer en action pour mesurer le spectre de la lumière manquante, ce qui nous indiquera la composition de la matière intermédiaire. Et c'est bien ce qui a été observé en mai et en juin derniers (voir l'encadré page ci-contre).

D'autres astronomes cherchent à compléter les mesures au travers des données d'archives afin d'en apprendre davantage sur le déclin de la luminosité de l'étoile à long terme. La connaissance de l'échelle temporelle de l'atténuation contraindrait encore un peu plus les théories sur l'étrange courbe de lumière de l'étoile et nous donnerait des pistes pour rechercher des indices observationnels supplémentaires.

Nous attendons aussi une meilleure mesure de la distance de l'étoile de Tabby (par la mission *Gaia* de l'Agence spatiale européenne) qui aiderait à éliminer certaines hypothèses. Si l'étoile est plus proche que 1300 années-lumière, la quantité de gaz et de poussière du milieu interstellaire dans la ligne de visée serait insuffisante pour expliquer le niveau actuel d'atténuation. Si, en revanche, la distance est d'environ 1500 années-lumière (la meilleure estimation actuelle), l'atténuation à long terme pourrait éventuellement être due à des motifs aléatoires de répartition de la poussière le long de la ligne de visée. Mais si l'étoile est beaucoup plus éloignée que cela, elle est alors plus lumineuse qu'on ne le pensait, et l'atténuation correspondrait à un retour à la normale après une fusion, comme l'a suggéré Brian Metzger.

En attendant d'autres données du télescope de Green Bank, de l'observatoire de Las Cumbres et de *Gaia*, nos spéculations sur l'étoile de Tabby ne connaissent que les limites de notre imagination et d'une bonne dose de physique. Comme avec les meilleures énigmes de la nature, la quête de la vérité pour cette étoile mystérieuse est loin d'être terminée. ■

BIBLIOGRAPHIE

F. J. Ballesteros *et al.*, **KIC 8462852 : Will the Trojans return in 2021 ?**, soumis à *MNRAS*, 31 mai 2017.

M. A. Sheikh *et al.*, **Avalanche statistics identify intrinsic stellar processes near criticality in KIC 8462852**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 117(26), article 261101, 2016.

T. S. Boyajian *et al.*, **Planet Hunters IX. KIC 8462852 : Where's the flux ?**, *MNRAS*, vol. 457(4), pp. 3988-4004, 2016.

M. Kenworthy, **Une exoplanète aux anneaux géants**, *Pour la Science*, n° 464, juin 2016.

65ème Congrès des Professeurs
de Physique et de Chimie
LIMOGES
du 28 au 31 octobre 2017

Terre de lumière

udppc www.udppc.asso.fr

Avec la participation de :

Julien BOBROFF

La quantique à l'œil nu

Thierry CHARTIER

Technologies Additives : une nouvelle façon de penser la fabrication de pièces céramiques

Cécile FERRARI

Dernières nouvelles du système solaire

Maurice MASHAAL

Journalisme versus pédagogie

Clotilde POLICAR

Les métaux et le vivant : des défis pour le chimiste

François REYNAUD

ALOHA : Astronomical Light Optical Hybrid Analysis.
Proposer un nouveau concept d'imagerie haute résolution en changeant la couleur de la lumière des étoiles

Nouveauté 2017 : Une journée découverte du patrimoine culturel et scientifique avec des visites offertes*

*Sous réserve du nombre de places

L'ESSENTIEL

> Plancton, mollusques, coraux et autres organismes marins calcifiants ne sont pas les seuls à être menacés par l'acidification des océans.

> Des expériences montrent que les sens des poissons-clowns, des poissons-demoiselles

et des requins se brouillent lorsqu'ils sont exposés à une eau plus acide.

> Cette confusion a un impact sur les comportements de chasse des prédateurs et de défense des proies.

L'AUTEURE



DANIELLE L. DIXON
maîtresse de conférence en science
et politique marines à l'université
du Delaware, à Newark, aux États-Unis

Poissons sous acide





UN POISSON-CLOWN QUI SE PRÉCIPITE DANS LA GUEULE DE SON PRÉDATEUR, UN REQUIN QUI ÉVITE SON METS PRÉFÉRÉ... VOILÀ CE QUI RISQUE D'ARRIVER À LA VIE MARINE EN 2100 SI L'OCÉAN CONTINUE DE S'ACIDIFIER.

Une anémone en guise de maison et un récif corallien pour quartier: c'est ainsi que vit le poisson-clown. Mais avant d'aller se nicher entre les bras protecteurs d'une anémone, il doit accomplir un périlleux voyage. Après l'éclosion, le poisson encore à l'état de larve quitte son récif natal pour la haute mer, où il achève son développement. Il nage pendant 11 à 14 jours, puis revient élire une anémone pour domicile. Avant d'atteindre son refuge, ce jeune poisson de moins de un centimètre croise sur sa route bien des menaces: labres, poissons-lions et autres poissons des récifs, prêts à avaler sans autre forme de procès.

Pour filer droit jusqu'à son objectif, le poisson-clown navigue principalement grâce à son odorat et son audition. Il ne peut compter sur sa vue, car il retourne au récif en général de nuit, lorsque les prédateurs sont peu actifs ou endormis, de préférence sous une lune peu lumineuse. L'odorat est particulièrement important: grâce à lui, le poisson détecte les molécules présentes dans l'eau qui le guideront vers son objectif. Une perturbation même minime de la chimie de l'océan pourrait mettre en péril ce délicat mécanisme de survie. Les scientifiques ont donc commencé à s'inquiéter des conséquences de l'acidification des océans, liée à l'augmentation du dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère, sur ce mécanisme.

UN PRÉDATEUR? OÙ ÇA?

En 2010, mes collègues et moi avons ainsi placé 300 larves de poissons-clowns tout juste éclos dans un aquarium rempli d'eau de mer. Quand nous injectons, près des poissons âgés de 11 jours, les substances odorantes d'un poisson herbivore, ils ne réagissent pas. Mais lorsqu'il s'agit de l'odeur d'un prédateur, ils s'éloignent. Nous avons répété l'expérience avec 300 nouvelles larves issues des mêmes parents, mais cette fois dans une eau où nous avons injecté du CO_2 de façon à atteindre le degré d'acidité prévu pour 2100 dans certaines parties du globe. Les poissons se sont développés normalement, mais aucun n'essayait d'éviter l'odeur du prédateur. En fait, ils avaient même tendance à nager droit dessus. Et lorsque >

> nous injections simultanément des odeurs de prédateurs et de non-prédateurs, les poissons semblaient incapables de s'y retrouver, nageant autant vers une source d'odeur que vers l'autre. Ils étaient capables de sentir les signaux chimiques, mais pas d'en reconnaître la signification. Ce changement de comportement est surprenant et assez préoccupant. Nous nous doutions que l'acidification des océans serait susceptible d'affecter la compréhension des stimuli chimiques, mais nous n'avions pas imaginé qu'elle pousserait un poisson à nager vers un danger imminent.

La survie de toute espèce dépend de la capacité de ses membres à remplir trois tâches fondamentales : trouver de la nourriture, se reproduire et éviter de devenir une source de nourriture. Dans des habitats aussi concentrés en espèces que les récifs coralliens, la sélection naturelle favorise d'autant plus celles capables d'échapper aux prédateurs. Dans ce contexte, toute perturbation de cette faculté peut avoir des conséquences importantes pour l'espèce, mais également pour l'écosystème corallien dans son ensemble.

Par ailleurs, si une eau de plus en plus acide interfère avec l'odorat du poisson-clown, elle pourrait aussi perturber d'autres sens. De plus, nous n'avons étudié qu'une seule espèce, mais l'odorat est important pour de nombreux organismes marins. A minima, la confusion constituerait un stress supplémentaire pour des poissons déjà confrontés à l'augmentation des températures, à la surpêche et aux perturbations des ressources alimentaires. Plus grave, si les habitants de l'océan commencent à adopter des comportements inadaptés, les chaînes alimentaires, les circuits de migration et *in fine* le fonctionnement des écosystèmes marins s'en trouveraient perturbés.

LA MENACE DU CO₂

Depuis la révolution industrielle, la concentration de CO₂ dans l'atmosphère a augmenté de 280 parties par million (ppm) pour atteindre 400 ppm aujourd'hui. Et elle serait bien plus importante sans les océans, qui en absorbent une bonne partie (*voir l'encadré page ci-contre*). Plus la concentration en CO₂ est élevée dans les océans, plus l'acidité est importante. Or si les émissions de CO₂ se poursuivent au même rythme, les eaux de surface devraient être plus acides de près de 150% en 2100 qu'aujourd'hui.

L'acidification des océans provoque la dissolution de la calcite et de l'aragonite, deux minéraux essentiels à la construction des coquilles et des exosquelettes de certains invertébrés marins. Des expériences menées par diverses équipes ont montré que des mollusques, oursins et organismes planctoniques élevés dans des aquariums remplis d'une eau contenant d'importantes concentrations de CO₂ développent des coquilles

ou des exosquelettes incomplets ou déformés. Cependant, les scientifiques pensaient que les poissons et autres organismes sans coquille échapperaient aux méfaits de l'acidification des océans. En effet, les premières recherches effectuées dans les années 1980 mettaient en évidence la capacité étonnante de certains animaux à réguler leur acidité interne en ajustant les quantités de bicarbonate et de chlorure dans leur organisme. Mais ces études s'intéressaient uniquement à la physiologie (l'aptitude d'un organisme à se développer normalement et à survivre dans une eau anormalement acide). Maintenir des fonctions de base telles que trouver de la nourriture et éviter le danger relève d'un tout autre défi. Notre groupe de recherche figure parmi les premiers à s'être attaqués à cette question : l'acidification peut-elle modifier les comportements des habitants des océans ?

DES SENS DÉFAILLANTS

Nos premières expériences menées sur le poisson-clown suggèrent fortement que l'acidification altère le comportement des animaux. Mais en plus de leur odorat, les poissons-clowns qui retournent à leur récif de nuit se fient à leur ouïe en se repérant grâce aux sons émanant du récif et des espèces qui le peuplent. C'est pourquoi, un an après nos expériences sur l'olfaction, nous avons décidé d'évaluer l'impact d'une eau plus acide sur l'audition des poissons.



Sous une forte acidité, les poissons-clowns ne comprenaient plus les stimuli auditifs



Nous avons placé de jeunes poissons-clowns (âgés de 17 à 20 jours) à l'intérieur d'une boîte dans un aquarium rempli d'eau de mer. Quand nous avons diffusé des bruits de récif enregistrés de jour (qu'ils devraient normalement éviter) à travers un côté de la boîte, les poissons se sont éloignés de la source sonore, restant quasiment les trois quarts de leur temps aux alentours de la paroi opposée. Mais lorsque nous avons recommencé l'expérience avec des poissons qui avaient passé leur courte vie dans une eau 60% plus acide – une acidité qui, selon les prévisions actuelles, sera

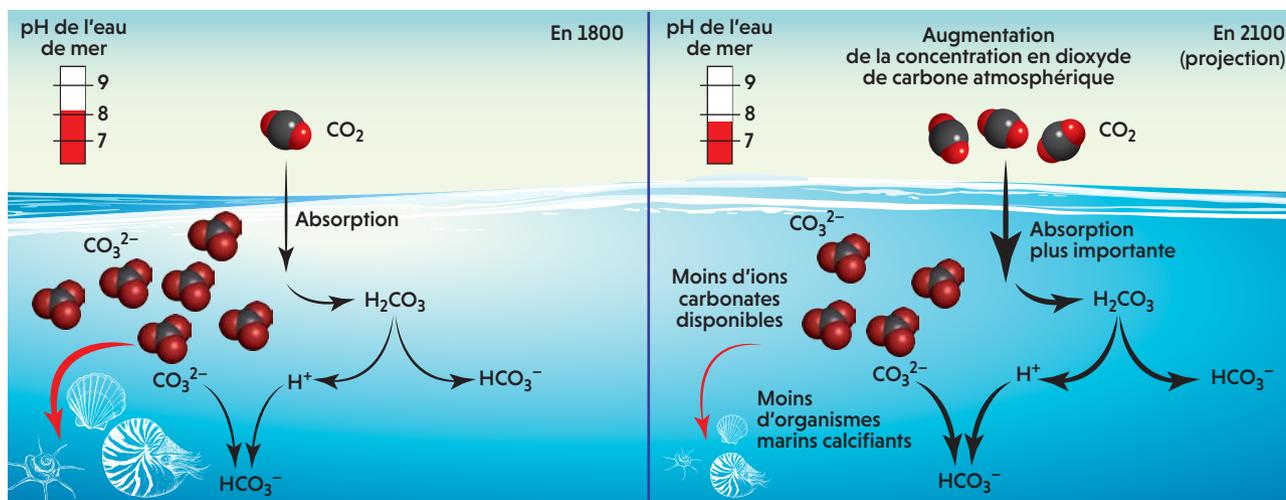
CO₂ ET ACIDIFICATION

L'augmentation du dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère, en lien avec les activités humaines, cause l'augmentation des températures à la surface du globe. Et ce phénomène serait bien pire sans les océans, qui absorbent environ 30 % du CO₂ atmosphérique. Mais cette absorption n'est pas sans conséquence sur la chimie des océans. Lorsque le CO₂ se dissout, il réagit avec l'eau (H₂O), provoquant la formation d'acide carbonique (H₂CO₃), qui lui-même se dissocie en ions H⁺ et bicarbonate (HCO₃⁻). La concentration des ions H⁺ détermine l'acidité, mesurée par le pH sur une échelle allant de 1 (pH très acide) à 14 (pH très alcalin). Plus la concentration en ions H⁺ augmente, plus le pH diminue : les océans s'acidifient.

Les ions H⁺ en surplus réagissent avec les ions carbonate CO₃²⁻ présents dans l'océan pour former des ions HCO₃⁻, ce qui entraîne une baisse de la disponibilité des ions carbonate. Or ces ions, que l'on retrouve associés au calcium dans les minéraux de calcite et d'aragonite, sont indispensables à certains organismes pour la construction de leur coquille ou de leur squelette. Pendant 800 000 ans, le pH est resté stable autour de 8,2. Mais depuis la révolution industrielle au XIX^e siècle, il a chuté à 8,1. Cette diminution peut paraître insignifiante, mais elle correspond à une baisse de 30 % du pH (son échelle étant logarithmique). Or les scientifiques estiment que ce phénomène va s'accélérer et que le pH pourrait atteindre 7,8 d'ici à la fin du siècle.

HÉLÈNE GÉLOT, journaliste scientifique

ACIDIFICATION DES OcéANS



atteinte vers 2030 –, les poissons n'étaient plus aussi prudents: ils restaient plus de 50% de leur temps du côté de la source sonore.

Nous avons répété l'expérience à deux reprises, avec une eau 100% et 150% plus acide – soit les acidités attendues en 2050 et 2100, respectivement. Dans les deux situations, les poissons-clowns passaient environ 60% de leur temps près des haut-parleurs diffusant les bruits de récif de jour. Nous avons aussi réalisé des tests afin de vérifier qu'aucun n'avait perdu le sens de l'audition. Ainsi, exposés à une acidité élevée, les poissons-clowns devenaient incapables de comprendre la signification des stimuli auditifs.

Difficile, pour des animaux marins aux sens défaillants, d'échapper aux prédateurs. Mais qu'en est-il des prédateurs eux-mêmes? Les requins ont un odorat ultrasensitif, sur lequel ils s'appuient pour se diriger, trouver leur partenaire et traquer leurs proies. Auraient-ils plus de mal à chasser dans une eau plus acide? C'est la question que nous nous sommes posée à la suite de nos résultats sur les poissons-clowns. Nous

avons séparé 24 émissoles douces (de petits requins collectés près de Woods Hole, dans le Massachusetts, le long de la côte est des États-Unis) dans trois bassins différents. Le premier bassin contenait de l'eau de l'océan puisée près de Woods Hole, le deuxième et le troisième de l'eau plus concentrée en CO₂, ajustée aux prévisions pour 2050 et 2100, respectivement.

Cinq jours plus tard, nous avons placé les requins dans des citernes de 10 mètres de long et de 2 mètres de large, dont l'eau avait la même acidité que celle du bassin qu'ils occupaient les jours précédents. Aux deux extrémités de chaque citerne était projeté un panache d'eau. Pendant que les requins nageaient, nous avons remplacé l'un des panaches par du «jus de calmar», obtenu en récupérant de l'eau de mer dans laquelle nous avons mis à tremper des calmars, leur repas préféré.

Des caméras et des logiciels de suivi ont enregistré la suite des événements. Les requins du premier groupe (eau non traitée) et du deuxième nageaient 60% du temps du côté où l'odeur de calmar était injectée. Mais les >

REQUINS, BARS ET CREVETTES PISTOLETS

Clac clac clac clac... Sous l'eau, un véritable concerto: les crevettes pistolets se font entendre à des milliers de kilomètres. Pour défendre leur territoire, leurs larges pinces se referment si rapidement que l'expulsion d'eau qui en résulte entraîne la formation, par cavitation, d'une bulle d'air. En implosant, celle-ci produit un son de haute fréquence (supérieure à 570 hertz) et pouvant atteindre plus de 200 décibels. En 2016, une équipe australienne de l'université d'Adélaïde s'est intéressée à l'impact de l'acidification des océans sur ce comportement.

En laboratoire comme en conditions naturelles, Tullio Rossi et ses collègues ont montré que la fréquence et l'intensité des claquements diminuent fortement lorsque la concentration de CO₂ dans l'eau est plus importante. Pourtant, les caractéristiques physico-chimiques de leurs pinces n'ont pas été altérées: c'est bien leur comportement qui a été modifié. Selon ces chercheurs, cette diminution du volume sonore pourrait perturber les organismes marins qui se repèrent en grande partie grâce à ce type de sons. En effet, il a été montré par ailleurs que les larves des Pomacentridés (une famille de poissons comptant notamment les poissons-clowns et les poissons-demoiselles) localisent les récifs coralliens en utilisant préférentiellement les sons de haute fréquence (supérieure à 570 hertz), similaires à ceux produits par les crevettes pistolets.



Dans une eau plus acide, la crevette pistolet produit des bruits moins intenses et moins aigus. Or des larves utilisent ces bruits pour repérer leur habitat dans le récif corallien...

La même année, ces chercheurs se sont penchés sur un autre sujet: les effets conjoints de l'acidification des océans et de l'augmentation des températures sur le comportement de chasse des requins. Dans une eau à température plus élevée, les requins sont plus actifs dans leur quête de nourriture. Notamment, ils localisent leur proie plus rapidement et nagent de manière plus active. Mais lorsque les requins

sont également intéressés aux effets conjoints du dioxyde de carbone (CO₂) et de l'augmentation de la température sur le comportement des poissons. L'équipe de recherche dirigée par José-Luis Zambonino, à Brest, élève des bars depuis plus de trois ans à trois concentrations de CO₂ et à deux températures différentes. Les chercheurs observent le comportement de ces poissons, évaluent leur performance de nage et mesurent leur activité en suivant leur consommation d'oxygène. Pour une même acidité, les bars sont plus réactifs lorsque la température est plus élevée. Mais plus la concentration de CO₂ est forte, et plus les poissons semblent anesthésiés. «Nos études sont toujours en cours, mais on suppose que le CO₂ aurait un effet sédatif sur les poissons», explique Guy Claireaux, chercheur au Laboratoire des sciences de l'environnement marin à l'université de Bretagne occidentale, professeur d'écophysiologie, d'écotoxicologie et d'énergétique des poissons et membre du projet. «Un peu à la manière d'une drogue ou de l'alcool sur le cerveau d'un humain, le CO₂ affecterait le système nerveux central des poissons. Si c'est le cas, cela expliquerait à la fois les comportements à risque et les interprétations confuses des stimuli olfactifs et auditifs observés sur plusieurs espèces de poissons par d'autres équipes.»

Un peu à la manière d'une drogue ou de l'alcool sur le cerveau d'un humain, le CO₂ affecterait le système nerveux central des poissons

sont exposés à une eau à la fois plus chaude et plus acide, ces effets positifs sont annulés: l'eau plus acide perturbe l'interprétation des signaux olfactifs et visuels chez ces prédateurs, affectant leur capacité de chasse.

Dans le cadre d'une collaboration franco-allemande, des chercheurs de l'université de Bretagne occidentale et de l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Ifremer) se

HÉLÈNE GÉLOT

> requins du troisième groupe évitaient soigneusement l'odeur de leur proie, passant moins de 15% du temps du côté diffusant le « jus de calmar ». En outre, les requins du premier groupe cognait et mordait de façon répétée une brique placée au-dessus du bec d'où sortait l'odeur de calmar. Et ce, deux fois plus souvent que ceux du deuxième groupe et trois fois plus que ceux du troisième.

C'est très surprenant de voir un prédateur se désintéresser de sa proie. Au sommet de la chaîne alimentaire, mais vulnérables aux changements environnementaux, les requins pourraient se retrouver très menacés par l'acidification des océans, de même que les écosystèmes où ils vivent.

DES POISSONS PLUS INTRÉPIDES

Il est toujours délicat d'affirmer que des comportements observés en laboratoire seraient identiques dans la nature. Nous nous sommes donc rendus dans un lagon sablonneux près d'une île australienne au nord de la Grande Barrière de corail pour examiner un autre caractère: la témérité. Là, nous avons testé comment des poissons-demoiselles juvéniles sauvages réagissaient à des odeurs de prédateurs après avoir été exposés à une eau acide pendant quatre jours. En laboratoire, parmi ces poissons, environ 50% de ceux qui avaient été exposés à une eau ajustée aux prévisions pour 2050 étaient attirés par l'odeur du prédateur; et tous ceux exposés à une eau encore plus acide (projections pour 2100) l'étaient aussi. Qu'en était-il en conditions naturelles?

Les poissons-demoiselles venant d'une eau plus acide s'aventureraient davantage hors du récif

Nous avons tatoué les poissons-demoiselles afin de les identifier et nous les avons ensuite relâchés sur un petit récif construit par nos soins dans le lagon. Ceux qui avaient été maintenus dans l'eau la plus acide présentaient un comportement à risque: au lieu de rester à proximité d'un corail, ils s'aventuraient hors du récif et ce, bien plus souvent que ceux qui étaient restés dans de l'eau non traitée. Et une fois de retour

au corail (effrayés par un plongeur), ceux qui avaient été exposés à l'eau la plus acide étaient aussi les plus prompts à ressortir de leur abri. De fait, la probabilité, pour les poissons les plus téméraires, d'être dévorés par un prédateur était neuf fois plus élevée que celle des poissons non exposés (et cinq fois plus élevée pour ceux qui avaient été exposés à l'acidité prévue en 2050).

Beaucoup de scientifiques utilisent les poissons récifaux comme objet d'étude, car leurs comportements sont connus et faciles à observer. Mais d'autres chercheurs se sont intéressés aux conséquences de l'acidification sur le comportement des invertébrés marins. Des effets ont ainsi été observés sur ces organismes, pas toujours négatifs. Ainsi, des biologistes de l'Institut de recherche de l'aquarium de Monterey Bay ont élevé des bernard-l'ermite dans des eaux plus acides. Ceux-ci ne se sont pas montrés plus intrépides que d'habitude. Au contraire, ils prenaient beaucoup plus de temps à réémerger de leur coquille quand ils étaient « attaqués » par un faux prédateur (une pieuvre en jouet).

Au Chili, Patricio Manríquez, de l'Institut de sciences marines et de limnologie, à Valdivia, et ses collègues ont travaillé avec des ormeaux, des mollusques qui s'accrochent aux rochers le long de rivages balayés par les vagues. Quand des vagues violentes détachent les ormeaux de leur support, ils se raccrochent rapidement pour ne pas se laisser emporter par les flots et devenir la proie de prédateurs. Le temps mis à se redresser dans une position permettant de se raccrocher est donc important pour leur survie. Lorsque les scientifiques ont retourné des ormeaux préalablement soumis à des concentrations plus fortes en CO₂, ceux-ci se redressaient plus rapidement qu'en conditions normales.

Ainsi, l'acidification des océans modifie le comportement des animaux marins et semble affecter plus particulièrement les poissons. Mais comment? Certains chercheurs se demandent si ce ne sont pas les stimuli eux-mêmes (les odeurs et les sons) qui sont altérés par l'acidité. Mais les expériences montrent que les poissons sont toujours en mesure d'identifier les stimuli chimiques dans une eau plus acide. D'autres scientifiques proposent que ces comportements étranges constituent une réponse au stress des poissons tentant de réguler leur acidité interne face à l'acidification de l'environnement, mais cette hypothèse requiert davantage d'investigations.

Suivant une intuition différente, Philip Munday, de l'université James-Cook, en Australie, et moi-même avons décidé de collaborer avec Göran Nilsson, de l'université d'Oslo. Son idée était que l'acidification interférait avec la fonction d'un neuro-inhibiteur appelé GABA. Cette molécule est connue pour moduler la transmission des messages nerveux dans le cerveau et le système nerveux de nombreux >

> animaux, dont les humains, en se liant à des canaux ioniques – les récepteurs GABA_A – nichés dans la membrane des neurones. En se fixant sur un tel récepteur, GABA ouvre le canal. Un flux d'ions chlorure pénètre alors dans le neurone, ce qui entraîne son hyperpolarisation et, par là, son inhibition.

Or quand des poissons sont exposés à une eau de mer plus riche en CO₂, et donc plus acide, les concentrations d'ions dans le sang et les tissus s'ajustent pour maintenir l'acidité de l'organisme. Notamment, des ions bicarbonate s'accumulent dans l'organisme pour contrer l'acidification, échangés contre des ions chlorure *via* les branchies. Nous nous sommes donc demandé si le CO₂ ne perturbait pas le fonctionnement des récepteurs GABA_A. La modification de composition ionique qu'il produit dans le milieu intérieur des poissons change le gradient électrochimique de part et d'autre de la membrane des neurones; peut-être au point d'inverser les flux d'ions lors de l'ouverture des canaux par GABA? Dans ce cas, des ions chlorure sortiraient des neurones, ce qui les dépolariserait. En d'autres termes, au lieu d'inhiber l'activité neuronale, l'interaction de GABA et de son récepteur l'exciterait, entraînant des changements comportementaux...

Pour le vérifier, nous avons exposé des poissons à de fortes concentrations de CO₂, puis les avons placés dans de l'eau contenant de la gabazine, une substance qui empêche le neuro-inhibiteur GABA de se lier à son récepteur et d'ouvrir le canal. Sans gabazine, les poissons se dirigeaient vers l'odeur de leur prédateur, mais après 30 minutes de traitement à la gabazine, ils ont retrouvé un comportement normal et ont fui l'odeur du prédateur. La fonction du récepteur GABA_A est donc bien perturbée par l'acidification. Néanmoins, sa sensibilité est très différente d'une espèce à l'autre. Il n'est donc pas certain que ce mécanisme soit la cause première des changements comportementaux observés.

LES POISSONS S'ADAPTERONT-ILS ?

La question que l'on me pose le plus souvent quand je parle de l'acidification des océans est la suivante: la vie marine peut-elle s'adapter? La capacité de résilience de la nature est stupéfiante. Prévoir si un organisme sera en mesure de s'adapter est déjà difficile, mais anticiper comment des écosystèmes complexes évolueront à la suite de l'acidification des océans est actuellement impossible.

La principale limite des expériences est la vitesse de l'acidification. Dans la plupart des études, les poissons sont élevés ou exposés à des concentrations élevées de CO₂ pendant quelques jours ou quelques mois: une échelle de temps extrêmement courte. Les animaux n'ont pas réellement l'occasion de s'acclimater (à

l'échelle d'un individu) ou de s'adapter (sur plusieurs générations, par le biais de l'évolution). L'idéal serait d'étudier les organismes marins dans leur milieu, sur des durées plus longues, et au fur et à mesure que l'océan s'acidifie.

Afin d'avoir un aperçu de ces conditions, les scientifiques observent des récifs situés près de volcans, où des gaz, dont du CO₂, s'échappent

La progéniture de poissons récifaux élevée dans une eau plus acide ne s'adaptait pas mieux

du sol. L'eau à ces endroits est donc naturellement aussi acide que le prévoient les scientifiques pour 2100. Lors de nos visites dans de tels récifs en Papouasie-Nouvelle-Guinée, nous avons noté que les poissons-demoiselles juvéniles étaient attirés par l'odeur du prédateur, ne savaient pas distinguer entre des odeurs de prédateurs et de non-prédateurs, et faisaient preuve d'un comportement risqué, comme nos poissons en laboratoire. Sur des récifs classiques, des poissons-demoiselles des mêmes espèces détectaient et évitaient les prédateurs, et étaient plus prudents.

Nous ne savons pas non plus si les comportements observés peuvent être transmis aux générations futures, et les recherches dans ce domaine n'en sont qu'au tout début. Dans une étude, la progéniture de poissons de récifs coralliens élevés sous de fortes concentrations de CO₂ ne montrait aucune capacité d'adaptation supplémentaire.

L'acidification des océans est un facteur de stress parmi d'autres. Surpêche, augmentation de la température de l'eau, pollution, disparition progressive des grands prédateurs, destruction des habitats... les menaces qui planent sur les habitants des océans sont nombreuses. Certaines pratiques locales, comme la coupe des nageoires des requins, peuvent être endiguées ou au moins limitées *via* des réglementations. Ce n'est pas le cas des atteintes telles que l'augmentation de la température et l'acidification des océans, dont les effets pourraient constituer, pour de nombreuses espèces, la goutte d'eau qui fait déborder le vase. ■

BIBLIOGRAPHIE

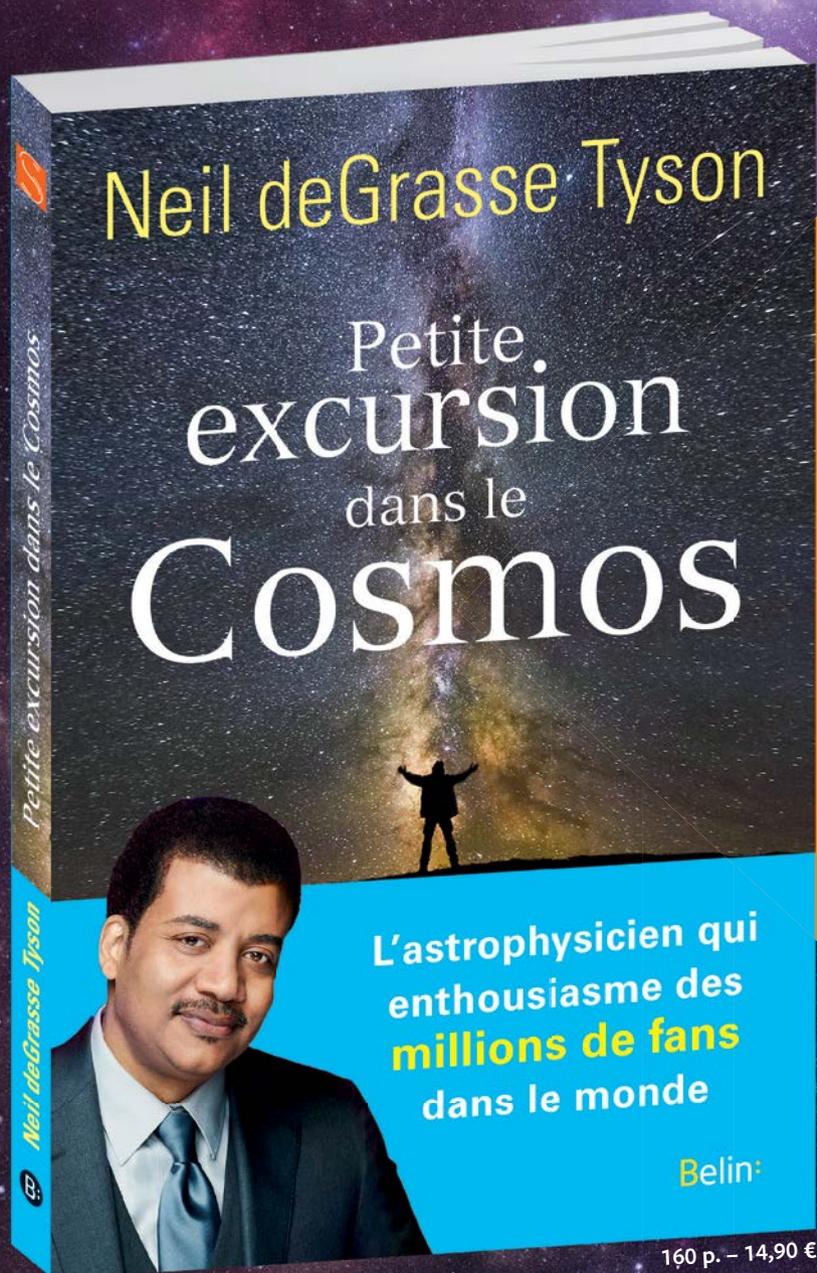
D. L. Dixson et al., **Odor tracking in sharks is reduced under future ocean acidification conditions**, *Global Change Biology*, vol. 21(4), pp. 1454-1462, 2015.

P. L. Munday et al., **Behavioural impairment in reef fishes caused by ocean acidification at CO₂ seeps**, *Nature Climate Change*, vol. 4, pp. 487-492, 2014.

G. E. Nilsson et al., **Near-future carbon dioxide levels alter fish behaviour by interfering with neurotransmitter function**, *Nature Climate Change*, vol. 2, pp. 201-204, 2012.

T. Rossi et al., **Silent oceans : Ocean acidification impoverishes natural soundscapes by altering sound production of the world's noisiest marine invertebrate**, *Proc. R. Soc. B*, vol. 283, 20153046, 2016.

Explorez les mystères de l'univers avec la star de l'astrophysique !



Quelle est l'histoire de l'univers?
Quelles sont les lois physiques
et les forces qui gouvernent
la matière? Qu'y a-t-il entre les
galaxies? Et entre les planètes?
Que sait-on sur la mystérieuse
matière noire et l'étrange énergie
sombre? Et d'où viennent les
éléments qui nous constituent tous?

Avec la verve, l'humour et l'esprit
qui le caractérisent, Neil deGrasse
Tyson, en digne héritier de Carl
Sagan, rend accessible à tous
les principes les plus compliqués
de l'astrophysique. Une invitation
irrésistible à lever la tête pour
admirer l'immensité de l'univers.

Dans la collection

S SCIENCE
À PLUMES

Belin:
ÉDITEUR

belin-editeur.com • [f /EditionsBelin](https://www.facebook.com/EditionsBelin) • [@editions_belin](https://twitter.com/editions_belin)

L'ESSENTIEL

> Dinosaures, éléphants et girafes atteignent de grandes tailles, mais ne rivalisent pas avec les êtres imaginaires de la science-fiction.

> Plusieurs phénomènes physiques limitent la taille des organismes. Ainsi, le poids exerce une pression sur les os, dont la résistance doit être adaptée au poids de l'animal.

> Un animal géant risquerait la surchauffe. Son métabolisme produirait beaucoup de chaleur qui s'échapperait trop lentement de son corps.

> Le réseau de neurones et la vitesse de transmission des signaux sont aussi des facteurs limitants. Un animal trop grand ne réagirait pas assez rapidement.

LES AUTEURS



ROLAND LEHOUCQ
astrophysicien
au CEA, à Saclay



J.-SÉBASTIEN
STEYER
paléontologue
au CNRS-MNHN,
à Paris

Des géants trop grands

LES ŒUVRES DE FICTION REGORGENT D'ÊTRES GIGANTESQUES. POURQUOI NE PEUT-IL EXISTER D'ANIMAUX AUSSI GRANDS ? GALILÉE SE POSAIT DÉJÀ LA QUESTION.

Cthulhu, King Kong, Godzilla, Shai-Hulud, Kaijus, les monstres géants de la science-fiction sont légion et leurs tailles hors du commun font de ces organismes des êtres particulièrement effrayants et puissants. Nous ne sommes pas naïfs au point de croire à l'existence de tels êtres, mais il est permis de s'interroger sur la pertinence de leur taille. Après tout, de gigantesques dinosaures, comme le *Diplodocus* ou le *Brontosaurus* (respectivement 35 et 22 mètres de long environ), n'ont-ils pas arpenté la surface de la Terre il y a plusieurs dizaines de millions d'années ?

Dans l'Univers, l'échelle des tailles varie d'environ 10^{-15} mètre, pour le proton (et probablement moins pour les particules élémentaires), jusqu'à 10^{26} mètres, le rayon de l'Univers observable. Dans ces 41 ordres de grandeur, la vie telle que nous la connaissons est confinée dans un intervalle de seulement 8 ordres de grandeur – des bactéries, mesurant de l'ordre du millionième de mètre, aux arbres, dont les plus hauts atteignent 100 mètres (voir l'encadré page 72).

Après la disparition des dinosaures non-aviens et d'autres espèces de grandes tailles,

c'est l'éléphant de savane d'Afrique (*Loxodonta africana*) qui détient le record du plus gros animal terrestre vivant : entre 6,5 et 7,5 mètres de long, 3 à 4 mètres de hauteur au garrot et une masse de 5 à 8 tonnes. En hauteur, il est dépassé par la girafe qui culmine à environ 5,7 mètres. Quels sont les critères qui sélectionnent la taille des êtres vivants ? Pourquoi ne pourrait-on voir un singe, comme King Kong, rivaliser de taille avec des gratte-ciel ? Si la gravité semble être la contrainte principale, elle n'est pas la seule. Il y a aussi la chaleur produite par le corps de l'animal et la durée de propagation de l'influx nerveux.

LA GRAVITÉ IMPOSE SA LOI

La question de la taille des espèces vivantes n'est pas nouvelle. Dans la deuxième journée de ses *Discours concernant deux sciences nouvelles*, publiés en 1638, Galilée l'aborde dans le cadre plus général de la résistance mécanique des structures. Il écrit : « Il apparaît clairement que, si l'on voulait conserver chez un géant particulièrement grand la proportion qu'ont les membres chez un homme ordinaire, il faudrait soit trouver une matière bien plus dure et plus résistante pour en constituer les os, soit admettre que sa résistance serait proportionnellement >





LE ROI DES GÉANTS

Dans la version du film de 1933, King Kong change de taille d'une scène à l'autre. Il mesure ainsi entre 5 et 18 mètres de hauteur. Il est même exagérément agrandi sur les affiches du film (ci-dessous).

> beaucoup plus faible que celle des hommes de tailles médiocres; sinon, à augmenter sans mesure sa hauteur, on le verrait plier sous son propre poids et s'écrouler. À l'inverse, on observe que, quand le corps diminue, les forces ne diminuent pas dans le même rapport, la résistance des corps très petits devenant même proportionnellement plus grande; ainsi je crois qu'un petit chien pourrait porter sur son dos deux ou trois chiens de la même taille, mais je ne pense pas qu'un cheval puisse porter un seul cheval, ayant la même taille que lui.»

Pour quantifier les conséquences de la modification des dimensions du corps sur sa résistance, considérons deux organismes de mêmes proportions mais de tailles différentes, deux éléphants par exemple, l'un grand et l'autre deux fois plus petit.

Ce sont bien sûr les os des membres qui soutiennent la masse corporelle de nos éléphants (on parle d'ailleurs d'animaux graviporteurs). Le poids que peuvent supporter les os dépend de deux quantités: la résistance de la matière osseuse et l'aire de leur section. Il est aisé de comprendre que des os plus résistants ou de plus grande section seront capables de soutenir un poids plus important. Le poids est proportionnel au volume, donc au cube de la taille. La masse du grand éléphant est ainsi $2^3=8$ fois supérieure à celle du petit, car ses trois dimensions (longueur, largeur et hauteur) sont le double de celles du petit éléphant.

En revanche, les os du grand éléphant ne pourront supporter des charges que $2^2=4$ fois plus importantes que ceux du petit, la section de l'os ayant une aire qui varie comme le carré de la taille. Ainsi, la pression subie par les os des membres du grand éléphant, rapport du poids de l'animal à l'aire de la section des os, sera le double de celle subie par les os du plus petit.

Autrement dit, les os d'un organisme de petite taille subissent une contrainte plus faible que ceux d'un géant: ce dernier est donc mécaniquement moins résistant. Cette caractéristique d'origine géométrique implique qu'il existe une taille maximale à partir de laquelle un tétrapode (animal possédant des vertèbres et généralement deux paires de membres) a une masse si élevée que son squelette interne devient incapable de le soutenir: il s'effondre alors sous son propre poids. Dans le cas d'un tétrapode terrestre, cette taille maximale est de l'ordre d'une trentaine de mètres.

Pour repousser cette limite, la solution la plus évidente est d'avoir un squelette constitué d'une matière plus résistante que l'os. Galilée l'avait déjà compris. Autre solution: vivre dans l'eau liquide. En effet, la poussée d'Archimède compense alors le poids de la partie immergée du corps et diminue d'autant la contrainte subie par le squelette. Il est d'ailleurs manifeste que le plus gros mammifère marin, le rorqual

QUELLE EST LA HAUTEUR MAXIMALE DES ARBRES?



Pour qu'un arbre vertical ne s'écrase pas sous son propre poids, il faut que la pression exercée par son poids sur une section basse de son tronc soit inférieure à la contrainte maximale supportée par le bois. Le calcul montre qu'un arbre vertical ne peut dépasser deux kilomètres, une valeur bien supérieure à la réalité... Il faut aussi prendre en compte le fait que l'arbre ploie sous le vent. Le poids exerce alors un couple qui accentue la déformation. Un équilibre s'établit avec le couple de la force de rappel élastique du bois si le diamètre du tronc est suffisant. L'action du vent élimine ainsi les arbres dont la taille est supérieure à une cinquantaine de fois le diamètre de leur tronc. Mais ce qui fixe la hauteur maximale des arbres, c'est leur capacité à pomper l'eau jusqu'aux feuilles du sommet. Cette limite résulte d'une compétition entre la gravité, qui tire l'eau vers le bas, et la transpiration foliaire qui «aspire» l'eau. Il en résulte une limite estimée à environ 100 mètres, atteinte par le séquoia à feuilles d'if et par *Eucalyptus regnans*.

bleu, est bien plus massif que l'éléphant d'Afrique: le premier pèse 150 tonnes, environ 30 fois plus que le second. Le rorqual est même plus massif que certains dinosaures géants (du groupe des sauropodes, à longue queue et long cou), dont la masse estimée n'est que quelques fois supérieure à celle d'un éléphant.

ATTENTION AU COUP DE CHAUD

La gravité n'est pas le seul facteur limitant pour la taille. Un autre processus physiologique des organismes de grande taille peut aussi poser problème: la régulation de leur température interne. Les animaux à sang chaud (dits homéothermes) perdent de l'énergie, car ils sont généralement plus chauds que le milieu dans lequel ils évoluent. Ces pertes se faisant par la surface externe du corps, elles sont proportionnelles à l'aire du corps.

Ainsi, pour garder le même exemple, un éléphant perd plus d'énergie qu'une musaraigne étrusque (*Suncus etruscus*, de longueur comprise entre 5,4 et 8,4 centimètres avec la queue), environ 100^2 fois plus si leur rapport de taille est de l'ordre de 100. Par ailleurs, l'énergie nécessaire au maintien de la température interne est

produite par une activité métabolique qui se déroule dans le volume du corps, 100^3 fois plus important chez l'éléphant que chez la musaraigne. Finalement, le rapport entre la perte d'énergie par la surface et sa production dans le volume est 100 fois plus faible chez le pachyderme que chez le rongeur miniature. Encore un coup du rapport surface/volume...

Autrement dit, les organismes homéothermes de petite taille, affligés par une trop grande surface relativement à leur volume, doivent compenser leur plus grande perte d'énergie par une alimentation plus abondante. Ainsi, la musaraigne étrusque doit quotidiennement absorber l'équivalent de sa masse en nourriture, tandis que l'éléphant peut se contenter de seulement 5 % de sa masse. Cette constatation reçoit le renfort de la mesure de l'activité métabolique par unité de masse chez la plupart des organismes vivants: elle est proportionnelle à l'inverse de la puissance $1/4$ de leur masse. Cette loi, découverte en 1932 par le chimiste suisse Max Kleiber, confirme que les organismes de grande taille ont, relativement à leur masse, des besoins énergétiques moindres que ceux de faible taille.

Avec une masse de 1,8 gramme, la musaraigne est le mammifère actuel le plus léger et représente sans doute la limite inférieure de

leur température interne: des vaisseaux sanguins, encore visibles sur les fossiles, irriguaient ces grandes plaques en losange, ce qui suggère qu'elles jouaient probablement un rôle dans la régulation thermique.

Quant aux grands dinosaures du groupe des sauropodes, ils étaient probablement à sang «froid», mais avaient une température interne supérieure à celle de l'extérieur car leur activité métabolique produisait une chaleur qui était évacuée par une surface insuffisante au regard de leur énorme volume. Ce phénomène, envisagé pour certains grands dinosaures, est nommé «homéothermie de masse». Même si les monstres géants de la science-fiction ont un métabolisme lent, ils doivent quand même produire une grande quantité de chaleur, car ils sont volumineux. Ils pourraient risquer la surchauffe du simple fait de se déplacer, sans parler de ce qui se passerait s'ils faisaient un petit sprint!

IL FAUT BIEN TRANSMETTRE L'INFORMATION

Les organismes vivants doivent être sensibles à leur environnement et traiter l'information reçue. Cela nous amène à un troisième facteur qui limite leur taille. Regardons d'abord comment un organisme réel gère un stimulus externe. Une morsure, une brûlure ou une coupure produit au niveau cellulaire un signal électrique qui atteint généralement le système nerveux central afin de provoquer une réaction (la fuite, le retrait ou la contre-attaque dans le cas d'un stimulus agressif).

Comment se déclenche le signal électrique? La concentration ionique (en ions sodium, potassium, chlore, calcium, etc.) de part et d'autre d'une membrane cellulaire est naturellement différente. Cette différence de concentration est source d'une différence de potentiel électrique, nommée potentiel de repos, qui est d'environ -70 millivolts chez la plupart des animaux. Le stimulus extérieur provoque un flux d'ions au niveau de la membrane de la cellule excitée. Il s'ensuit une modification de la différence de potentiel électrique et une «dépoliarisation» de la membrane. Elle revient ensuite à son état normal (repolarisation) avec éventuellement une baisse au-delà des -70 millivolts de l'état de repos (hyperpolarisation). Ces différentes phases engendrent le signal électrique, nommé potentiel d'action, en un à deux millièmes de seconde.

Sur Terre, que vous soyez une limace (mollusque), un cloporte (crustacé) ou un puma (mammifère), c'est grâce au potentiel d'action que les informations de l'environnement sont transmises en permanence au système nerveux central. Chez la plupart des animaux (sauf les éponges et les placozoaires), le potentiel d'action est transmis par >



En considérant le temps que le signal arrive au cerveau, un géant aurait des réflexes très lents



masse pour un animal à sang chaud vivant sur notre planète. En deçà, il serait sans doute trop difficile de maintenir une température interne constante.

S'ils sont relativement favorisés en période de disette, les organismes de grande taille peuvent avoir quelques soucis de surchauffe si aucune précaution n'est prise. Ainsi, les éléphants d'Afrique ont de grandes oreilles qui les aident à évacuer leur chaleur interne. La double rangée de plaques osseuses que portaient sur l'échine les dinosaures herbivores de type stégosaures avait probablement plusieurs fonctions. Ces plaques régulaient probablement

> des cellules spécialisées, les neurones. Le nombre de neurones varie d'un organisme à l'autre: on en compte de l'ordre de 100 milliards chez l'humain – dont 500 millions environ se situent dans notre intestin – et 100 000 chez le homard ou le crabe.

À quelle vitesse l'information neuronale est-elle transmise? Cela dépend surtout de l'épaisseur et de la nature des neurones, notamment de leur partie centrale nommée axone: plus le diamètre de l'axone augmente, plus la résistance interne baisse et plus la vitesse du signal est grande. Ainsi, de grands organismes tels que le calmar géant (jusqu'à 13 mètres de long, tentacules compris) ont des neurones dont les axones sont très épais, afin de transmettre le signal assez rapidement.

Mais ce n'est pas tout. Une substance principalement composée de lipides nommée myéline peut gagner certains axones et jouer le rôle d'isolant électrique, ce qui accroît la vitesse de propagation du potentiel d'action: cette vitesse peut passer de 0,5 à 10 mètres par seconde dans des axones sans myéline à près de 150 mètres par seconde avec myéline.

Même dotés d'axones à myéline, des êtres imaginaires de grande taille et ressemblants aux organismes terrestres, comme King Kong (un primate géant) ou Godzilla (un horrible reptile mutant), seront donc très lents à réagir. En effet, le potentiel d'action mettra de l'ordre d'une seconde pour aller d'une extrémité de leur corps au cerveau. Leurs réflexes lamentables les rendent beaucoup moins dangereux qu'ils n'en ont l'air!

UN TRÈS GROS CERVEAU EST UN CERVEAU LENT

La durée de transmission de l'information neuronale limite aussi la taille du cerveau. En effet, pour qu'une pensée puisse se développer et agir utilement, il faut bien sûr un cerveau suffisamment complexe, mais aussi une « durée de pensée » suffisamment brève. La vitesse des transmissions neuronales étant de l'ordre d'une centaine de mètres par seconde, un signal nerveux traverse le cerveau humain en environ un millième de seconde. Durant sa vie, le cerveau d'un humain sera donc, selon ce modèle simpliste des pensées, traversé par plusieurs milliers de milliards d'impulsions nerveuses. Si notre cerveau était 10 fois plus gros, avec la même vitesse de propagation de l'influx nerveux et la même durée de vie, nous aurions 10 fois moins de « pensées » au cours de notre vie.

Pour être traversé par le même nombre d'impulsions que celui de l'humain, un cerveau de la taille du Système solaire et où la vitesse de transmission serait égale à celle de la lumière aurait besoin d'une durée de l'ordre de l'âge de l'Univers. Il est donc raisonnable d'affirmer que

des organismes ayant un cerveau rivalisant en complexité avec le cerveau humain ne peuvent pas être trop grands, car, sinon, ils n'auraient pas le temps de penser à grand-chose. De ce point de vue, le « nuage noir », mis en scène par l'astrophysicien anglais Fred Hoyle dans son roman éponyme (1957), n'est guère plausible: avec une taille de l'ordre de celle du Système solaire, le rythme de ses pensées doit être extraordinairement lent. Pas facile de discuter avec lui, donc.

SANS NEURONES ET SANS CERVEAU

Notons enfin que les neurones ne sont pas obligatoires, car il existe d'autres cellules capables de transmettre un potentiel d'action. C'est le cas des cellules musculaires et endocrines, mais aussi des cellules tubulaires des plantes vasculaires ou « trachéophytes » (c'est-à-dire presque toutes les plantes sauf les mousses). Comme ces dernières transmettent le signal moins rapidement que les cellules animales, les grands végétaux communiquent plus lentement. C'est peut-être pourquoi J. R. R. Tolkien, dans le *Seigneur des Anneaux* (1954-1955), imagine de grandes plantes humanoïdes, les Ents, qui parlent et agissent très lentement. Il est aussi difficile d'imaginer un réseau planétaire de plantes connectées tel que celui mis en scène sur la planète Pandora dans *Avatar* (James Cameron, 2009). Notons enfin que, sur notre planète, le plus grand organisme vivant n'est ni une plante ni un animal; il s'agit d'un champignon armillaire (*Armillaria solipides*) âgé de plusieurs milliers d'années et couvrant 9,6 kilomètres carrés dans les Blue Mountains de l'Oregon, aux États-Unis!

Revenons aux animaux. Le système nerveux central (qui centralise l'information, mais n'est pas forcément au centre de l'organisme) n'est pas obligatoire non plus! C'est le cas des échinodermes (oursins, étoiles de mer, etc.) qui ont une sorte d'anneau ramifié entourant la bouche (système nerveux péribuccal) et d'où partent cinq cordons nerveux. Il en est de même des arthropodes (crustacés, insectes, arachnides, etc.) dont le système nerveux dessine une sorte de « corde à nœuds » dans l'ensemble du corps, avec parfois des ganglions au niveau de la tête et de l'œsophage. Faut-il imaginer Godzilla, King Kong ou d'autres monstres géants avec des systèmes nerveux d'oursins ou d'araignées géantes? Cela améliorerait sans doute leurs réflexes en distribuant les centres de commande musculaire.

Si la science-fiction met souvent en scène des êtres extraordinaires, la vie réelle explore et teste des possibles qui peuvent surprendre, voire dérouter: toutes deux nous rappellent que l'évolution est une incroyable source de questions, d'inspiration et d'émerveillement. ■

BIBLIOGRAPHIE

D. Purves *et al.*,
Neurosciences,
De Boeck, 2015.

G. W. Koch *et al.*,
The limits to tree height,
Nature, vol. 428,
pp. 851-854, 2004.

G. B. West *et al.*,
**Allometric scaling
of metabolic rate from
molecules and
mitochondria to cells
and mammals**,
PNAS, vol. 99,
pp. 2473-2478, 2002.

Galilée, **Discours
concernant deux sciences
nouvelles**, PUF, 1995.

Tous les papiers se recyclent,
alors trions-les tous.

**C'est aussi
simple à faire
qu'à lire.**

La presse écrite s'engage pour le recyclage
des papiers avec Ecofolio.



L'expérience du cerveau coupé en deux

QUE SE PASSE-T-IL QUAND LES COMMUNICATIONS SONT ROMPUES ENTRE LES DEUX HÉMISPHÈRES CÉRÉBRAUX? C'EST CE QU'A ÉTUDIÉ MICHAEL GAZZANIGA DANS LES ANNÉES 1960, PRÉCISANT AINSI LES FONCTIONS DE CHAQUE HÉMISPHÈRE...

Au début des années 1960, le neuroscientifique américain Michael Gazzaniga a conscience de vivre un moment historique quand il teste les capacités cognitives de patients au «cerveau divisé». Ces derniers sont des épileptiques dont les deux hémisphères cérébraux ont été déconnectés par une opération chirurgicale afin de limiter leurs crises. «C'était ma première journée de chercheur, raconte Michael Gazzaniga quarante ans plus tard. À peine la porte d'entrée franchie, une tâche me fut assignée. Les expériences sur le cerveau divisé que j'avais élaborées durant ma dernière année à Dartmouth College allaient enfin être pratiquées sur des patients, ici, à Rochester.»

Les tests révéleront alors un fait étonnant: lorsque les patients voient un objet dans la moitié gauche de leur champ visuel – analysée par l'hémisphère droit du cerveau –, ils sont incapables de donner son nom. Une découverte qui remplit le jeune chercheur de fierté: «Ce résultat, nous l'avons obtenu grâce à une expérience que j'avais conçue, mise au point et réalisée, moi, un simple doctorant de l'Institut de technologie de Californie! C'est ainsi qu'a commencé l'histoire moderne de la recherche sur le cerveau divisé. J'ai passé les cinq années suivantes dans une sorte d'état de grâce, à travailler tous les jours dans l'une des institutions scientifiques les plus intéressantes du monde, avec l'un des plus grands biologistes de tous les temps, Roger Sperry.»

Si l'étude des cerveaux divisés (*split brains* en anglais) commence vraiment avec les expériences de Michael Gazzaniga, ses prémices remontent aux années 1940. Les neurologues cherchaient alors à soigner des patients épileptiques sur qui les médicaments n'avaient aucun effet. Ils s'étaient aperçus que les crises se transmettaient parfois d'un hémisphère cérébral à l'autre à travers le corps calleux, un faisceau de fibres reliant les deux moitiés du cerveau comme un câble électrique. Pourrait-on les contenir en sectionnant ce câble, profondément enfoui dans la fissure entre les deux hémisphères? Les neurochirurgiens tentèrent l'opération sur des animaux, puis sur vingt-six patients souffrant de crises épileptiques sévères. Avec des résultats peu probants, qui conduisirent à l'abandon provisoire de la technique.

Il faudra attendre plus de vingt ans pour que deux neurochirurgiens de Los Angeles tentent à nouveau de l'appliquer. Certains >



© Stefano Fabbri

L'ESSENTIEL

> Il y a un demi-siècle, des neurochirurgiens ont sectionné le corps calleux – le principal réseau de fibres reliant les deux hémisphères cérébraux – de certains patients épileptiques, afin d'endiguer leurs crises.

> En étudiant ces patients, Michael Gazzaniga a pu attribuer différentes fonctions à chaque hémisphère du cerveau.

> Si le gauche prend généralement en charge le langage, le droit traite la perception des visages.

L'AUTEURE



DANIELA OVADIA
codirectrice du laboratoire Neurosciences
et société de l'université de Pavie,
en Italie, et journaliste scientifique



Les personnes dont le cerveau est coupé en deux ont une vision altérée de leur environnement. Ce qui apparaît dans certaines parties de leur champ visuel, notamment, ne peut être verbalisé...

> patients acceptent de subir l'intervention, car les crises rendent leur quotidien invivable: elles surviennent jusqu'à dix fois par jour et menacent même d'être fatales. Les neurochirurgiens sectionnent alors leur corps calleux de façon plus précise et plus profonde que lors des précédents essais, et, cette fois, le succès thérapeutique est au rendez-vous. Les crises d'épilepsie ont grandement diminué, mais qu'en est-il des capacités cognitives des patients? Certains neurologues ne s'attendent pas à des changements spectaculaires. Chaque hémisphère possède en effet des compétences et des tâches spécifiques – déduites du « modèle lésionnel » de l'époque, qui associe un trouble particulier à chaque zone lésée chez des patients victimes d'un accident vasculaire cérébral. D'ailleurs, les tests menés dans les années 1940 par le neurologue Andrew Akelaitis sur le premier groupe de patients au corps calleux sectionné n'avaient révélé aucune anomalie.

Mais pour le neurobiologiste Roger Sperry, qui a sectionné quelques années plus tôt le corps calleux de rats, de chats et de singes, l'intervention n'est pas anodine sur le plan cognitif. Les animaux opérés avaient en effet des comportements étranges. Quant aux tests d'Akelaitis, peut-être n'étaient-ils pas assez précis?

C'est à ce moment qu'entre en scène la jeune neurologue Michael Gazzaniga. Durant ses études, il imagine une série de tests pour évaluer les fonctions cognitives des deux hémisphères, avec le fol espoir d'être autorisé à les expérimenter sur les patients opérés dans les années 1940. Son travail attire l'attention de Sperry, qui le convoque à l'Institut de technologie de Californie (Caltech) lorsqu'il apprend que certains neurochirurgiens pratiquent à nouveau la callosotomie thérapeutique.

UN DISPOSITIF QUI NE SOLLICITE QU'UN SEUL HÉMISPHERE

L'histoire des neurosciences retiendra les initiales de deux patients soumis aux tests du jeune chercheur: W. J. et V. P. Le premier a 47 ans quand il accepte de passer les tests, au début des années 1960. Souffrant de crises d'épilepsie depuis une blessure contractée à la tête à l'âge de 25 ans, il vient d'être opéré. Des années plus tard, l'invention de l'imagerie par résonance magnétique permettra de confirmer que son corps calleux est complètement sectionné.

Le test le plus connu passé par W. J. sert à mesurer les capacités mathématiques. Au centre d'un écran d'ordinateur s'affiche brièvement une opération simple – une addition ou une multiplication. Juste après, des nombres sont présentés en alternance d'un côté ou de l'autre d'un repère, également situé au centre de l'écran, et que le patient doit fixer. Pour chacun d'eux, le patient doit dire s'il s'agit ou non

du résultat de l'opération. Grâce à ce dispositif astucieux, chaque nombre est perçu par un seul hémisphère. S'il est présenté dans la moitié droite du champ visuel, c'est l'hémisphère gauche qui le voit, et *vice versa*, puisque les fibres du nerf optique se croisent pendant leur parcours de la rétine au cortex visuel.

Le résultat de l'expérience est clair: lorsque les nombres sont présentés dans la moitié droite du champ visuel, et donc perçus par l'hémisphère gauche, W. J. identifie correctement les réponses exactes. Quand ils sont affichés dans la partie gauche du champ visuel, et donc traités par l'hémisphère droit, il répond au hasard.

CHRONOLOGIE

1940

Des chercheurs établissent que les crises épileptiques diffusent d'un hémisphère à l'autre en passant par le corps calleux. Deux neurochirurgiens américains, William Van Wagenen et Yorke Herren, tentent alors de les endiguer en sectionnant ce dernier – une opération nommée callosotomie –, créant des patients au « cerveau divisé » (ou patients *split-brain*).

1944

Le psychiatre et neurologue Andrew Akelaitis décrit pour la première fois les effets cognitifs de l'opération.

1956-1958

Roger Sperry, biologiste spécialisé dans l'étude du comportement animal, met au point une batterie de tests pour analyser le cerveau divisé chez les rats, les chats et les singes.

1962-1967

Michael Gazzaniga, Joseph Bogen et Roger Sperry appliquent les protocoles expérimentaux mis au point

sur les animaux à une nouvelle série de patients *split-brain*.

1971

Les tests effectués sur des patients ayant subi une callosotomie partielle révèlent que chaque section du corps calleux possède une fonction spécifique.

1978

Michael Gazzaniga et Joseph LeDoux introduisent le concept d'un hémisphère gauche « interprète », qui nous permettrait de décrire et d'expliquer ce que nous voyons et ce que nous faisons.

1981

Roger Sperry remporte le prix Nobel de médecine pour ses découvertes sur la spécialisation des hémisphères cérébraux.

1982

Jeffrey Holtzman montre que les deux hémisphères collaborent encore parfois pour traiter les informations, même après la section du corps calleux, grâce à des connexions résiduelles.

1989

Steven Luck montre que chez des patients ayant subi une callosotomie totale, chaque hémisphère peut diriger son attention visuelle sur une zone spécifique.

2003

L'hémisphère droit étant supérieur dans le traitement de l'information visuospatiale, Paul Corballis suggère qu'il tranche entre les perceptions visuelles ambiguës et crée une représentation fiable du monde.

Conclusion: c'est l'hémisphère gauche qui se charge d'effectuer les calculs mentaux.

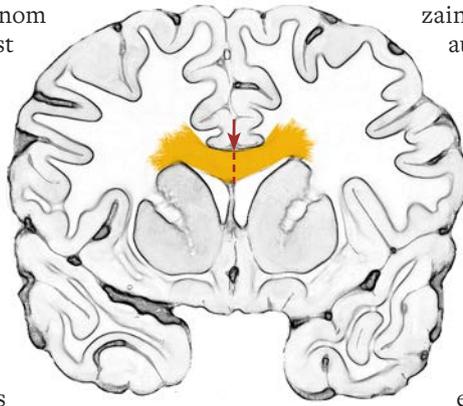
V. P., également désignée par le prénom Vicky dans la littérature scientifique, est quant à elle une jeune femme qui a subi une callosotomie en 1979, à l'âge de 27 ans. En 1984, un examen d'imagerie par résonance magnétique (IRM) révèle que toutes les connexions entre les deux hémisphères n'ont pas été sectionnées: quelques fibres sont restées en place à l'avant et à l'arrière du corps calleux. Elles représentent moins de 2 % des connexions, et l'une des expériences impliquant V. P. vise à étudier si des informations visuelles sont transmissibles à travers ces quelques fibres restantes.

Lors de cette expérience, deux images sont présentées à V. P. dans des parties distinctes de son champ visuel, afin que chacune soit traitée par un hémisphère différent. La patiente doit déterminer si elles ont une couleur, une forme ou une taille identique. Il faut alors que les deux moitiés du cerveau comparent ce qu'elles ont perçu. Mais les résultats indiquent que V. P. répond au hasard, signe que ses deux hémisphères ne communiquent pas, malgré les fibres épargnées. Lors d'une seconde expérience, on fait lire à la patiente des paires de mots, là encore disposées de façon qu'un mot soit traité par chaque hémisphère, et elle doit indiquer s'ils riment ou non. V. P. répond cette fois de façon assez précise. Certaines informations à caractère verbal circulent d'un hémisphère à l'autre.

Le cas de cette jeune femme contribue à l'établissement d'une carte fonctionnelle du corps calleux: différentes parties de cette structure véhiculent ainsi les informations motrices, somatosensorielles, auditives ou visuelles. Des recherches récentes ont aussi montré l'existence de connexions subcorticales entre les deux hémisphères cérébraux, qui ne sont pas atteintes lors d'une callosotomie.

DE CURIEUX SYMPTÔMES

Les patients au cerveau divisé (ou patients *split-brain*) ont des symptômes curieux: quand on présente un mot à leur hémisphère droit, ils ne le comprennent pas, car ce côté du cerveau n'est pas dédié aux fonctions linguistiques (du moins chez les droitiers). Mais si on leur demande d'écrire ce qu'ils ont vu en utilisant la main gauche – commandée par l'hémisphère droit –, ils y parviennent correctement. De même, si on bande les yeux d'un patient en lui glissant dans la main gauche une brosse à dents, il reconnaît l'objet à partir de sa forme et exprime sa fonction en mimant le geste de se brosser les dents, mais il est incapable de le nommer. En effet, il n'a pas accès à sa bibliothèque de mots, qui se trouve dans l'autre hémisphère du cerveau.



Le corps calleux (en orange), constitué de multiples fibres nerveuses, forme un pont entre les deux hémisphères cérébraux. Il est profondément enfoncé dans la crevasse qui sépare ces derniers. L'opération de callosotomie consiste à le sectionner (flèche rouge).

Grâce aux recherches de Michael Gazzaniga et d'autres neuropsychologues sur une douzaine de patients *split-brain*, nous savons aujourd'hui qu'un cerveau sain ressemble à deux machines indépendantes reliées par des câbles qui transmettent une grande quantité d'informations. Quand une connexion est interrompue, comme dans le cas de la callosotomie, l'information perçue par un hémisphère – qu'il s'agisse d'un mot, d'une image ou d'une sensation tactile – n'est pas transmise à l'autre. Avec les conséquences que nous avons décrites. Ces recherches ont aussi montré que, la plupart du temps et de façon très simplifiée, l'hémisphère gauche remplit principalement des fonctions linguistiques tandis que l'hémisphère droit traite surtout des informations visuelles et spatiales, s'occupant notamment de la reconnaissance des visages.

DEUX HÉMISPHÈRES SÉPARÉS, MAIS UNE CONSCIENCE

Michael Gazzaniga avait déjà compris que les deux hémisphères sont capables d'effectuer presque toutes leurs tâches de manière indépendante. Ces deux moitiés du cerveau ont toutefois deux «visions» différentes du monde, ce qui a suscité un vif intérêt chez les chercheurs qui étudient la personnalité et la conscience. «L'idée que la séparation des deux hémisphères créerait un individu porteur de deux consciences était fascinante, mais la réalité n'est pas aussi simple», tempérait toutefois le psychologue américain Michael Miller dans la revue *Nature* en 2012, à l'occasion des quarante ans du premier test sur les patients *split-brain*. En effet, chaque «module» du cerveau ne porte pas une conscience distincte, celle-ci dépendant aussi des multiples connexions qui parcourent l'encéphale.

Et les patients de Michael Gazzaniga, que sont-ils devenus? Ils vieillissent petit à petit et l'âge rend les longues séances de tests et d'évaluation moins faciles. Certains sont déjà décédés. Aujourd'hui, la section du corps calleux est presque complètement abandonnée, en raison de l'existence de traitements plus efficaces. En outre, pour étudier le fonctionnement de chaque hémisphère, nous disposons de techniques plus performantes et utilisables sur des sujets au corps calleux intact, comme l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle ou la stimulation magnétique transcrânienne (qui permet d'activer ou d'inhiber certaines zones du cerveau avec des impulsions magnétiques). Mais grâce aux patients *split-brain*, qui ont accepté de se soumettre pendant des décennies à des expériences neuroscientifiques, nous savons bien mieux quoi chercher et quelles zones explorer. ■

BIBLIOGRAPHIE

D. Wolman, **A tale of two halves**, *Nature*, vol. 483, pp. 260-263, 2012.

M. Gazzaniga, **Le cerveau divisé**, *Pour la Science*, n° 251, 1998.

M. Gazzaniga et al., **Some functional effects of sectioning the cerebral commissures in man**, *PNAS*, vol. 48, pp. 1765-1769, 1962.

R

ENDEZ-VOUS

P.80 Logique & calcul
 P.86 Art & science
 P.88 Idées de physique
 P.92 Chroniques de l'évolution
 P.96 Science & gastronomie
 P.98 À picorer

LA SUITE DE FIBONACCI... ET SES SUITES

La suite de Fibonacci est célèbre, au point d'avoir inspiré d'autres constructions: une suite de mots, des fractales, un arbre... Tous ces objets mathématiques constituent des terrains inépuisables de découvertes, encore aujourd'hui.

L'AUTEUR



JEAN-PAUL DELAHAYE
 professeur émérite
 à l'université de Lille
 et chercheur au Centre
 de recherche en
 informatique, signal
 et automatique de Lille
 (Cristal).

Le dernier ouvrage
 de J.-P. Delahaye:
**Mathématiques
 et mystères**,
 une sélection de ses
 chroniques parues
 dans *Pour la Science*
 (Belin, 2016).

La suite (F_n) de Leonardo Fibonacci est définie par $F_0=0$, $F_1=1$ et $F_n=F_{n-1}+F_{n-2}$ pour $n>1$. Ses premiers termes sont donc $F_0=0$, $F_1=1$, $F_2=1$, $F_3=2$, $F_4=3$, $F_5=5$, $F_6=8$, $F_7=13$, $F_8=21$, $F_9=34$, $F_{10}=55$, $F_{11}=89$, $F_{12}=144$, ...

Les mathématiciens, amateurs ou professionnels, l'étudient obstinément. Elle est simple, l'utiliser dans un test d'intelligence serait un cadeau, et pourtant elle engendre des surprises variées, des théorèmes et même des conjectures. Cette suite et le nombre d'or $\phi=1,618033988\dots$, limite du rapport de deux termes consécutifs de la suite, se retrouvent partout en mathématiques (voir l'encadré 1).

Cette ubiquité un peu semblable à celle du nombre π , qui lui aussi est présent dans une multitude de contextes mathématiques, physiques et biologiques, a une explication évidente qui devrait calmer les numéologues plus ou moins sérieux voulant voir un mystère profond susceptible d'éclairer les sciences et les arts.

L'explication de l'ubiquité de la suite de Fibonacci et du nombre d'or est que ce sont des objets simples, puisqu'ils ont des définitions simples, et que les objets simples sont bien sûr partout!

La simplicité de la suite de Fibonacci n'est pas la même que celle des nombres 2 , $\sqrt{3}$, π ou e , eux aussi omniprésents; mais, sur le plan mathématique, c'est une suite à peu près aussi élémentaire que les suites arithmétiques ($s_{n+1}=s_n+r$) et les suites géométriques ($s_{n+1}=ks_n$), elles aussi rencontrées dans des contextes variés.

Reste que la suite de Fibonacci est à l'origine de questions délicates parfois difficiles et souvent inattendues. Sans refaire le parcours de tout ce qu'on sait sur elle (il faudrait un gros livre), évoquons quelques propriétés et questions fascinantes qui la concernent.

UNE MULTITUDE DE DÉFINITIONS

D'abord, nous noterons que la définition que nous avons donnée n'est qu'une définition parmi une multitude. En voici quelques autres.

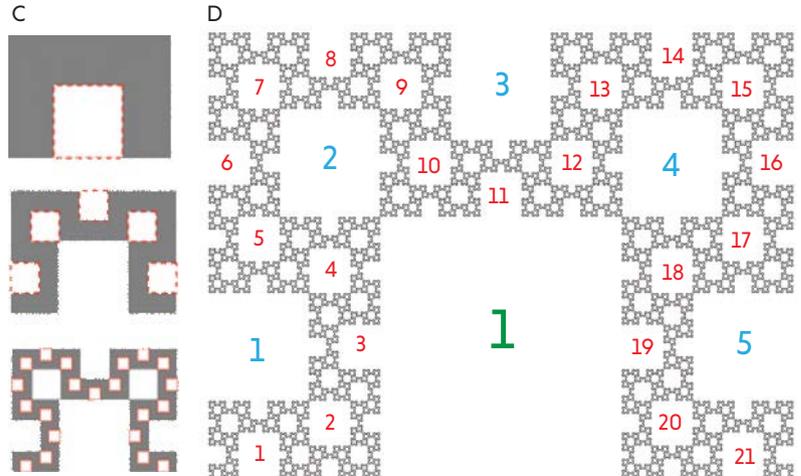
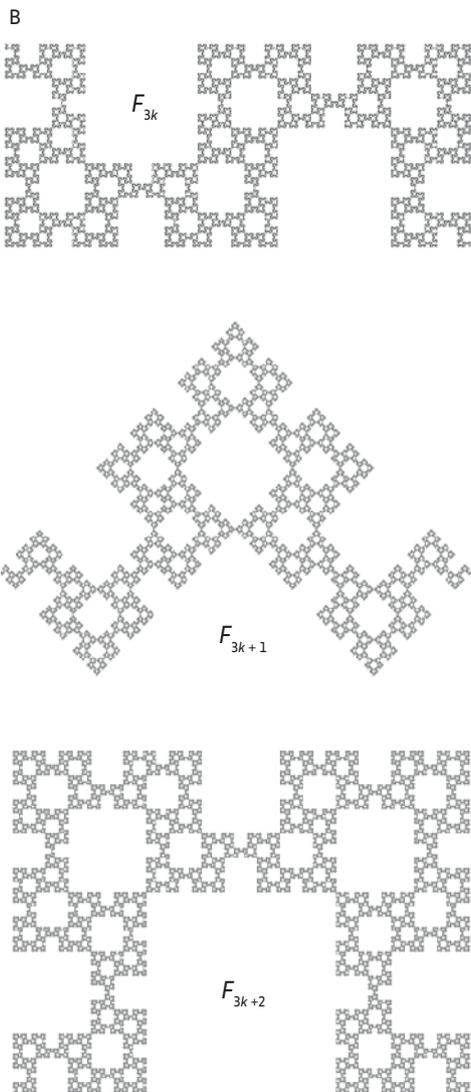
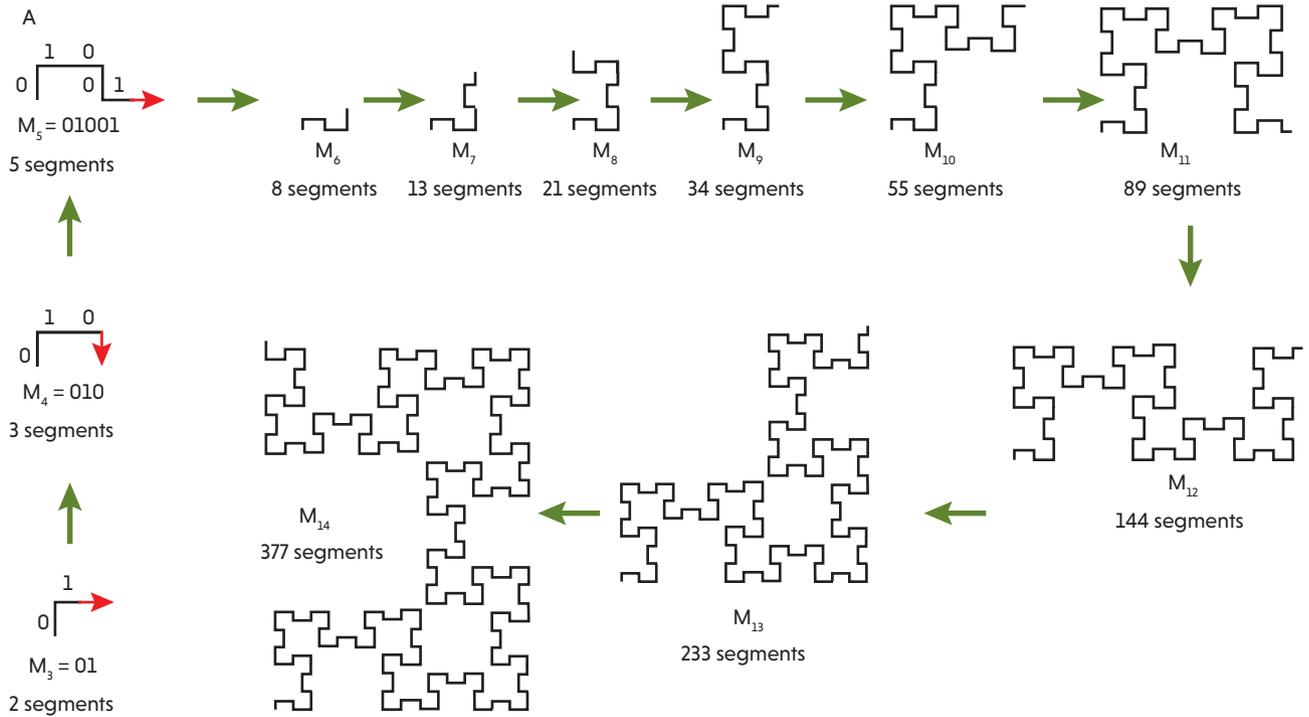
- Le nombre F_n est le nombre de façons d'écrire n comme une somme de nombres entiers impairs. On a ainsi $F_6=8$ car il y a 8 façons d'écrire 6 comme somme de nombres entiers impairs: $6=1+1+1+1+1+1=1+1+1+3=1+1+3+1=1+3+1+1=3+1+1+1=1+5=5+1=3+3$.

- Le nombre F_n est le nombre de suites de longueur n composées d'entiers compris entre 1 et $n-2$ commençant par 1 et dont deux termes consécutifs diffèrent toujours exactement d'une unité. On retrouve $F_6=8$, car il y a 8 telles suites: 121212, 121232, 121234, 123212, 123232, 123234, 123432, 123434.

- Le nombre F_{n+2} est le nombre de mots de longueur n composés de 0 et de 1 et n'ayant pas deux 1 consécutifs. On retrouve par exemple que $F_5=5$, car il existe exactement 5 mots de longueur 3 ne comportant pas deux 1 consécutifs: 000, 100, 010, 001, 101. La valeur $F_6=8$ provient des 8 mots de longueur 4 ne comportant pas deux 1 consécutifs: 0000, 1000, 0100, 0010, 0001, 0101, 1001, 1010.

- Le nombre F_{n+1} est le nombre de façons de paver un rectangle $2 \times n$ avec des





LES FRACTALES DE FIBONACCI

3

Partant d'un mot M_n de Fibonacci, on lui associe un dessin (figure A) :
 - on se place à l'origine, en se dirigeant vers le haut ;
 - quand on lit la k -ième lettre de M_n , on trace un segment unité en suivant la direction que l'on a, puis :
 - si la k -ième lettre lue est un 1, on garde la même direction ;
 - si la k -ième lettre lue est un 0, on tourne vers la droite si k est pair, et vers la gauche si k est impair.

Les courbes correspondant aux entiers n de la forme $3k$ convergent vers une fractale,

de même que les courbes correspondant aux entiers de la forme $3k + 1$, ou $3k + 2$ (figure B). La fractale obtenue par exemple pour $3k + 2$, s'obtient aussi par un procédé d'évidement (C et D) : partant d'un rectangle, on en retire un carré noté 1 (en vert dans D), puis des carrés de taille un peu plus petite (numérotés en bleu) à ce qui reste. On recommence avec ce qui reste (carrés numérotés en rouge), et ainsi de suite.

La frontière de cette fractale de dimension 1,6379... est elle-même une fractale, de dimension 1,2465...

> algorithme efficace dont le nombre d'opérations pour calculer F_n n'augmente que logarithmiquement avec n . C'est plus efficace que la formule de Binet $F_n = (\phi^n - 1/(-\phi)^n)/\sqrt{5}$ avec $\phi = (1 + \sqrt{5})/2$, car pour l'utiliser, il faut d'abord connaître $\sqrt{5}$ et ϕ avec une grande précision.

Trouver les formules que nous venons de mentionner n'est pas très facile, mais les démontrer quand on les connaît est une simple question de patience: on mène un raisonnement par récurrence en utilisant $\phi^2 = 1 + \phi$ pour la formule de Binet, puis, par simple substitution et simplification, on prouve les deux formules permettant le calcul rapide.

FACTORISATION DES TERMES DE LA SUITE ET NOMBRES PREMIERS

Parmi les questions les plus étudiées figurent celles liées à la factorisation des nombres de la suite de Fibonacci. La page www.maths.surrey.ac.uk/hosted-sites/R.Knott/Fibonacci/fibtable.html donne la factorisation en nombres premiers des 300 premiers termes de la suite.

Une remarquable propriété des termes de la suite est: «Si n divise m , alors F_n divise F_m .» Ainsi, puisque 5 divise 15, on en déduit que $F_5 = 5$ divise $F_{15} = 610$. De même, puisque 10 divise 100, il s'ensuit que $F_{10} = 55$ divise F_{100} , ce qui est vrai puisqu'on a:

$$F_{100} = 3 \times 5^2 \times 11 \times 41 \times 101 \times 151 \times 401 \times 3001 \times 570601.$$

On tire du précédent résultat que: «Si F_n est premier, alors n est premier.» On le vérifie en constatant que tous les nombres premiers de la suite ont des numéros qui sont des nombres premiers: $F_2 = 2$; $F_3 = 5$; $F_5 = 13$; $F_7 = 89$; $F_{11} = 233$; $F_{17} = 1597$; $F_{23} = 28657$; $F_{29} = 514229$; $F_{43} = 433494437$.

Autre propriété inattendue: «Si n et m sont premiers entre eux (c'est-à-dire n'ont pas de diviseur commun), alors il en est de même des termes correspondants F_n et F_m .» Il en résulte que deux termes consécutifs de la suite n'ont jamais de facteur commun.

Encore plus surprenant: «Pour tout entier m , la suite de Fibonacci considérée modulo m est périodique.» On vérifie que la suite 0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, 233, 377, 610, 987, 1597, 2584, ..., prise modulo 2, donne: 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, ..., qui est de période 3. Modulo 3, la période est 8: 0, 1, 1, 2, 0, 2, 2, 1, 0, 1, 1, 2, 0, 2, 2, 1, 0, 1, 1, ... (le cycle est noté en bleu).

DES CONJECTURES QUI RESTENT À PROUVER

Reste une série de questions non résolues. Ainsi, on conjecture qu'il existe une infinité de nombres premiers dans la suite de Fibonacci, sans que l'on sache le démontrer.

Une remarquable conjecture concernant la suite de Fibonacci affirmait que les seuls

nombres qui sont des puissances parfaites dans la suite sont $0=0^n$, $1=1^n$, $8=2^3$ et $144=12^2$. Cette conjecture a été démontrée récemment par les mathématiciens Yann Bugeaud et Maurice Mignotte, de l'université de Strasbourg, associés au mathématicien britannique Samir Siksek, de l'université de Warwick. Ils ont publié leur résultat dans l'une des plus prestigieuses revues de mathématiques, *Annals of Mathematics*: l'intérêt pour la suite de Fibonacci n'est pas l'exclusivité des amateurs numéroluges.

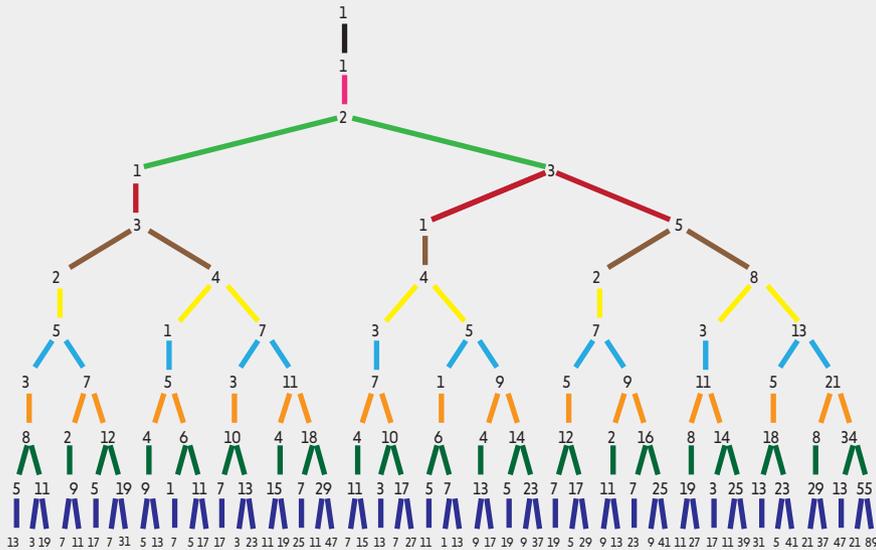
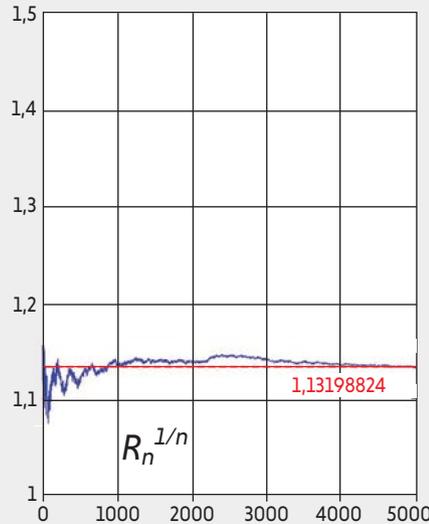
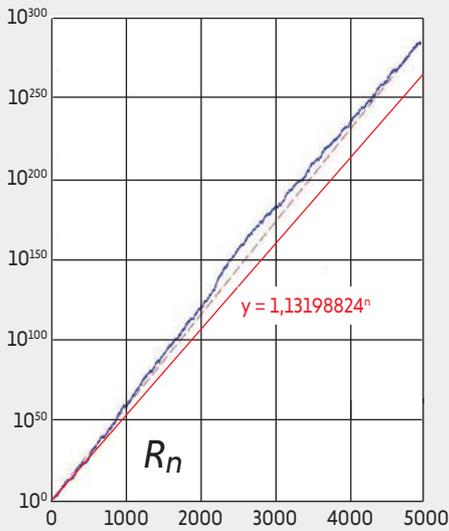
Parmi les conjectures en attente, mentionnons encore celle-ci: «Pour tout nombre premier p , le premier terme de la suite de Fibonacci non nul et divisible par p n'est pas divisible par p^2 .»

LES MOTS DE FIBONACCI

La définition de la suite de Fibonacci en suggère une, analogue, pour les «mots» composés de 0 ou 1: $M_1 = 1$; $M_2 = 0$; $M_n = M_{n-1} + M_{n-2}$ pour $n > 1$. Le «+» signifie ici la concaténation. Il existe des variantes à cette définition quand on change les deux premiers mots, mais on retombe le plus souvent sur la même suite de mots, éventuellement décalée. Le début de la suite de mots est: $M_1 = 1$; $M_2 = 0$; $M_3 = 01$; $M_4 = 010$; $M_5 = 01001$; $M_6 = 01001010$; $M_7 = 0100101001001$; $M_8 = 010010100100101001010$; $M_9 = 01001010010010100100101001001$; $M_{10} = 01001010010010100100101001001010010010100100101001010$, ... Le lien avec la suite numérique de Fibonacci est immédiat: la longueur de M_n est F_n . Un peu d'attention montre aussi que le nombre de 0 dans M_n est F_{n-1} et que le nombre de 1 est F_{n-2} . Il s'ensuit que le rapport entre le nombre de 0 et le nombre de 1 dans M_n tend vers le nombre d'or.

La méthode de la concaténation utilisée pour la construction est ici équivalente à une autre méthode: pour passer d'un mot au suivant, on remplace chaque 0 par 01 et chaque 1 par 0. On remarque que chaque nouveau mot de la suite prolonge le précédent, ce qui signifie qu'en poursuivant la construction, on obtient un mot infini composé de 0 et de 1: c'est le «mot infini de Fibonacci».

Une façon totalement inattendue de calculer ce mot infini fait apparaître un lien profond avec le nombre d'or ϕ . On trace le quadrillage du plan qui le découpe en carrés de côté 1, soit toutes les droites d'équations $x=n$ ou $y=n$ avec n entier positif. On dessine la droite de pente ϕ passant par l'origine; cette droite est d'équation $y=\phi x$. On la parcourt en commençant à l'origine des axes. À chaque fois que l'on croise une droite verticale du quadrillage, on écrit un 0, et à chaque fois que l'on croise une droite horizontale, on écrit un 1. Le mot infini que l'on obtient 0100101... est le mot infini de Fibonacci (voir l'encadré 2). >



SUITES ALÉATOIRES ET ARBRE DE FIBONACCI

4

On peut construire une suite aléatoire inspirée de celle de Fibonacci en posant :

$R_0 = 0, R_1 = 1$ et, pour tout entier $n > 1, R_n = R_{n-1} + R_{n-2}$ ou $|R_{n-1} - R_{n-2}|$ avec une probabilité $1/2$ pour chaque cas. Divakar Viswanath a montré que, sauf dans des cas de probabilité totale nulle, la suite $R_n^{1/n}$ converge vers une constante réelle $V = 1,132...$ (la « constante de Viswanath »).

On représente toutes les suites aléatoires de Fibonacci à l'aide d'un arbre unique. On ne figure dans cet arbre que les suites qui ne repassent pas par un même couple de nombres

consécutifs (qui serait comme un retour en arrière) : chaque nœud droit a deux descendants, l'un provenant de la somme (placé à droite), l'autre de la différence des deux termes au-dessus (placé à gauche) ; chaque nœud gauche n'en a qu'un, celui de la somme qui est considéré comme un nœud droit. Cet arbre, étudié par Benoît Rittaud, a d'extraordinaires propriétés, dont les deux suivantes :

- le nombre de nœuds de niveau n est donné par la suite de Fibonacci ;
- tout couple d'entiers (a, b) premiers entre eux apparaît une fois exactement avec a juste au-dessus de b .

> Voici encore quelques propriétés de la suite des mots de Fibonacci.

Les deux dernières « lettres » d'un mot de Fibonacci sont alternativement 01 et 10, d'un mot au suivant. En supprimant ces lettres, ce qui reste est un palindrome, c'est-à-dire un mot symétrique par rapport à son centre. Exemple : sans ses deux dernières lettres, M_8 devient 0100101001001010010, qui est identique à lui-même quand on le lit à l'envers.

Les mots de Fibonacci et le mot infini de Fibonacci ne contiennent jamais le sous-mot 11 ni le sous-mot 000.

Étrangement, concaténer deux mots de Fibonacci successifs dans un ordre ou un autre donne presque la même chose. Plus précisément, $M_n M_{n-1}$ et $M_{n-1} M_n$ sont identiques sauf pour les deux dernières lettres, qui sont inversées. Ainsi, on a $M_5 M_6 = 0100101001010$, tandis que $M_6 M_5 = 0100101001001$.

On trouve dans les mots finis ou le mot infini de Fibonacci des répétitions triples consécutives. Exemple : le sous-mot 010 figure trois fois de suite dans le mot $M_8 = 0100101001001010$. En revanche, on ne trouvera jamais de répétition quadruple d'aucun sous-mot.

Le nombre réel dont l'écriture en base 2 est donnée par le mot infini de Fibonacci 0,010010100... est, comme les nombres π et e , un nombre transcendant, c'est-à-dire qu'il n'est la racine d'aucune équation polynomiale à coefficients entiers.

Le nombre de sous-mots différents de longueur n présents dans le mot infini de Fibonacci est exactement $n+1$. Par exemple, les seuls sous-mots de longueur 4 qu'on trouvera sont 0010, 0100, 0101, 1001 et 1010.

On sait depuis 2012, grâce aux profonds et difficiles travaux de Yann Bugeaud et Boris Adamczewski, que les nombres réels dont le rapport (nombre de sous-mots de longueur n de leur écriture en base 2)/ n est borné sont soit des nombres rationnels, c'est-à-dire des rapports de deux entiers, soit des nombres transcendants. Avec la propriété énoncée juste avant, ce théorème prouve à nouveau que le nombre réel dont les chiffres binaires sont ceux du mot infini de Fibonacci est un nombre transcendant.

DES FRACTALES À PARTIR DES MOTS DE FIBONACCI

Disposant des mots finis de Fibonacci, il est tentant de les utiliser pour dessiner une courbe. La méthode suivante produit un intéressant résultat.

1) On choisit un mot M_n , dont on va parcourir les F_n lettres en dessinant des segments de longueur 1.

2) On part de l'origine et on se dirige verticalement, « vers le haut ».

3) Quand on lit la k -ième lettre de M_n , on trace un segment en suivant la direction que l'on a.

4) Si la k -ième lettre lue est un 1, on garde la même direction.

5) Si la k -ième lettre lue est un 0, on tourne vers la droite si k est pair, et vers la gauche si k est impair.

Les courbes ainsi construites (voir l'encadré 3) ne se recoupent jamais. Elles se classent en trois catégories, selon que l'indice du mot utilisé est un multiple de 3, un multiple de 3 additionné de 1, un multiple de 3 additionné de 2. Si l'on s'intéresse à toutes les courbes correspondant aux multiples de 3, en les tournant et en les ramenant à la même taille, il apparaît que les courbes convergent vers une forme unique très découpée. Cette forme limite a été étudiée par l'amateur français Alexis Monnerot-Dumaine en 2008. Le facteur d'agrandissement entre le dessin correspondant à l'indice k et le dessin pour l'indice $k+3$ est $1+\sqrt{2}$, et la dimension fractale (ou dimension de Hausdorff) de la figure limite est :

$$3 \log \phi / \log(1+\sqrt{2}) = 1,6379\dots$$

Rappelons que la dimension de Hausdorff d'une courbe lisse (cercle, droite, parabole, etc.) est 1, que la dimension de Hausdorff d'un morceau de surface plein (disque, carré rempli, etc.) est 2. La valeur 1,6379... trouvée pour la figure associée aux mots de Fibonacci prouve donc sa nature fractale au sens rigoureux du terme : cette figure est de dimension non entière, ici comprise entre 1 et 2.

La frontière de cette fractale est aussi très découpée. C'est une autre figure fractale, dont la dimension est plus petite ($\log 3 / \log(1+\sqrt{2}) = 1,2465\dots$) que la précédente.

De manière remarquable, d'autres procédés de construction conduisent à cette même forme fractale. En voici deux.

On sait que le célèbre tapis de Sierpiński s'obtient par évidements successifs : un carré plein est divisé en 9 carrés identiques ; on retire le carré central ; on recommence avec les 8 carrés restants, etc. La fractale de Fibonacci s'obtient aussi par évidements successifs : on part d'un rectangle plein de côtés 1 et $\sqrt{2}$, on enlève un carré de côté $1/\sqrt{2}$ au milieu en bas du rectangle, puis on recommence en enlevant à chaque étape une série de carrés dont la taille est divisée d'une étape à l'autre par $1+\sqrt{2}$ et dont la position suit une règle facile à comprendre en observant les deux premières étapes (voir l'encadré 3).

À la grande surprise de tous, Ron Knott a découvert un procédé encore plus simple pour arriver à cette fractale de Fibonacci : on suit les chiffres d'un mot de Fibonacci en traçant des segments de longueur 1 comme dans la première construction, mais maintenant on tourne à droite ou à gauche à chaque nouvelle lettre,

en changeant de direction pour tourner quand la lettre lue est 1.

Une idée très naturelle de généralisation de la suite de Fibonacci faisant intervenir le hasard est la suivante : on pose $R_0=0$, $R_1=1$ et, pour tout entier $n>1$, $R_n=R_{n-1}+R_{n-2}$ ou $|R_{n-1}-R_{n-2}|$ avec une probabilité $1/2$ pour chaque cas.

Autrement dit, à chaque nouveau nombre calculé, on choisit au hasard, avec une probabilité $1/2$, d'additionner les deux derniers, ou de les soustraire l'un à l'autre sans s'occuper du signe du résultat.

Un remarquable résultat a été établi au sujet de ces suites aléatoires de Fibonacci par Divakar Viswanath, de l'université du Michigan : avec une probabilité 1, la suite $R_n^{1/n}$ converge vers une constante réelle V égale à 1,132...

Cette nouvelle constante mathématique jamais rencontrée auparavant a bien sûr été dénommée constante de Viswanath. Elle est très mal connue et ceux qui s'y sont intéressés sont en désaccord dès sa quatrième décimale. Certains prétendent que c'est 1,132150... alors que d'autres affirment que c'est 1,131988... Un lecteur pourra-t-il mener des calculs qui tranchent la question ?

Notons que l'expression « avec une probabilité 1 » signifie qu'il y a autant de chances d'obtenir une autre limite que la constante de Viswanath qu'il y a de chances de tomber toujours sur pile en lançant indéfiniment une pièce de monnaie non truquée dans une série infinie de tirages à pile ou face.

L'ARBRE DE FIBONACCI

On peut représenter toutes les suites aléatoires de Fibonacci à l'aide d'un arbre. Si l'on ne souhaite représenter que les suites qui ne repassent pas par un même couple de nombres consécutifs (car c'est en quelque sorte revenir en arrière), dessiner l'arbre de toutes les suites aléatoires de Fibonacci devient simple (voir l'encadré 4). Ce nouvel arbre mathématique, introduit par Benoît Rittaud, de l'université Paris 13, présente d'intéressantes propriétés :

- le nombre de nœuds de niveau n est donné par la suite de Fibonacci ;

- la somme S_k des nombres de la ligne k vérifie $S_k = 2S_{k-1} + S_{k-3}$.

Surtout, cet arbre présente l'extraordinaire et inattendue propriété que tout couple d'entiers (a, b) premiers entre eux apparaît une fois exactement avec a juste au-dessus de b et que le chemin qui y mène est directement lié à la fraction continue du nombre a/b .

On le voit, loin de s'épuiser, l'intérêt pour la suite de Fibonacci et les objets apparentés semble s'étendre et produire sans cesse des idées, théorèmes et conjectures qui enrichissent la connaissance des procédés élémentaires de construction associés et leurs mystères. ■

BIBLIOGRAPHIE

K. Hare et J. C. Saunders, **On (a, b) pairs in random Fibonacci sequences**, prépublication arXiv:1608.03522, 2016.

S. Eliahou, **Mystères arithmétiques de la suite de Fibonacci, Images des Mathématiques**, 2014 : <http://bit.ly/2rzvtvJ>

A. Monnerot-Dumaine, **The Fibonacci Word fractal**, 2009 : <http://bit.ly/2rzgiCv>

B. Rittaud, **On the average growth of random Fibonacci sequences**, *Journal of Integer Sequences*, vol. 10, article 07.2.4, 2007.

Y. Bugeaud et al., **Classical and modular approaches to exponential Diophantine equations I. Fibonacci and Lucas perfect powers**, *Annals of Mathematics*, vol. 163, pp. 969-1018, 2006.

L'AUTEUR



LOÏC MANGIN
rédacteur en chef adjoint
à *Pour la Science*

L'ATTAQUE DES FÉROCES ESCARGOTS

Dans nombre d'enluminures du Moyen Âge, des chevaliers combattent de terrifiants... escargots. Comment expliquer de telles joutes sans pitié?

D

ans *Monty Python: Sacré Graal!*, film sorti en 1975, un épisode célèbre met en scène le terrible lapin tueur de Caerbannog, égorgueur de chevaliers, dont seule la sainte Grenade d'Antioche viendra à bout. On pourrait réécrire la scène en remplaçant le petit animal à grandes oreilles avec un autre encore moins dangereux de réputation: l'escargot. Pourquoi un escargot? Pour les mêmes raisons qu'un lapin!

Tous les deux apparaissent à plusieurs reprises sous la forme d'enluminures dans

les marges de nombreux manuscrits médiévaux. Le plus souvent, ils sont aux prises avec des chevaliers armés dans des combats féroces. Le folio 16 du *Festal Missal*, rédigé à Amiens en 1323 par Garnerus de Morolio et illustré par Petrus de Raimbaucourt, est un bel exemple (*ci-contre*). Le gastéropode projette ses tentacules comme des lances vers un couple qui n'en mène pas large malgré son arsenal (épée, poignard, bouclier...). Comment expliquer ce motif récurrent?

Ce type d'enluminures est à classer parmi les « drôleries », des facéties picturales qui n'ont rien à envier à l'exubérance des tableaux de Jérôme Bosch, par exemple le *Jardin des délices*. Que ces fantaisies relèvent du pur amusement ou, pour certaines, de la subversion n'empêche pas de s'interroger sur une éventuelle source d'inspiration. De fait, ces drôleries témoignent du sens de l'humour et des préoccupations de l'époque.



L'ultime combat
de l'homme
et de la bête...

Les combats de chevaliers contre les escargots seraient d'abord apparus en France au XIII^e siècle avant d'essaimer en Angleterre et en Flandres. Étonnamment, d'où qu'ils viennent, les combats se ressemblent beaucoup dans leur mise en scène, au point que l'on peut supposer une transmission de pays à pays.

Plusieurs spécialistes ont tenté d'interpréter ces images. Selon des historiens, ces affrontements seraient une critique de la lâcheté, un lourd péché à cette époque très religieuse. Jean de Dunois, noble et militaire du xv^e siècle, et compagnon d'armes de Jeanne d'Arc, y voyait plutôt une métaphore de la



résurrection du Christ... sortant de sa coquille. Plus récemment, l'historien Lilian Randall propose de relier les escargots aux lombards, des prêteurs sur gages – et parfois usuriers – du Moyen Âge (ce métier serait né en Lombardie, en Italie, d'où leur nom). L'image peu flatteuse d'un corps mou aurait été associée à ce corps de métier peu digne de confiance.

Enfin, d'autres explications sont plus explicites et renvoient à de réels escargots, notamment ceux qui saccageaient régulièrement le vignoble français. De tels nuisibles méritaient d'être combattus, les chevaliers des enlumineurs

symbolisant les agriculteurs qui devaient quotidiennement lutter contre ce fléau à coquille. De fait, les escargots sont liés depuis toujours à la vigne dont ils apprécient particulièrement les bourgeons et les jeunes feuilles. Ils demeurent un problème pour les viticulteurs actuels. Les drôleries feraient ainsi état d'un combat permanent des humains contre un ravageur des cultures.

Une cause similaire expliquerait la présence des lapins. Dans son *Histoire naturelle*, l'écrivain romain du 1^{er} siècle Pline l'Ancien (très estimé au Moyen Âge) raconte que les habitants des îles Baléares ont réclamé auprès des

autorités romaines des soldats pour exterminer les prolifiques lapins qui détruisaient les cultures et entraînaient des famines. Des soldats ont donc bien combattu des lapins, des animaux tueurs (*via* les disettes). Cet épisode a pu inspirer les enlumineurs et les érudits Monty Python.

Les escargots et les lapins renvoient les dragons, loups et autres prédateurs au rang de bestioles inoffensives et toutes mignonnes... ■



Retrouvez la rubrique
Art & science sur
www.pourlascience.fr

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY
professeur de physique
à l'université
Pierre-et-Marie-Curie, à Paris



ÉDOUARD KIERLIK
également professeur
de physique à l'université
Pierre-et-Marie-Curie

CONCENTRÉS DE LUMIÈRE

Pour concentrer beaucoup de lumière sur une petite surface, on peut utiliser une loupe ou un autre système analogue. Mais ce n'est pas le plus efficace. On fait beaucoup mieux avec des systèmes optiques «non imageants», composés par exemple de miroirs paraboliques.

Pour concevoir des fours solaires, des torches ou des phares performants, on s'efforce de réaliser des faisceaux qui concentrent la lumière dans une région limitée de l'espace. Or les systèmes optiques qui forment des images – loupe, objectifs ou autres – ne sont pas les plus performants.

Imaginons que l'on cherche à concentrer la lumière du Soleil sur une pastille de 1 centimètre de diamètre à l'aide d'une loupe (une simple lentille convergente). L'image du Soleil se forme dans le plan focal de la lentille. Pour qu'elle soit plus petite que la pastille, il faut une focale de moins de 1 mètre, étant donné le diamètre apparent du Soleil (de l'ordre de 32 minutes d'arc, soit un centième de radian). La puissance reçue par la pastille sera alors proportionnelle à la surface de la loupe.

N'y a-t-il alors pas de limite à la concentration et à la puissance obtenue? Si, et un dispositif imaginé en 1982 par le physicien américain Roland Winston l'illustre bien. Considérons deux sources lumineuses identiques A et B, ponctuelles et isotropes (émettant de façon égale dans toutes les directions), placées dans une cavité parfaitement réfléchissante constituée de l'union d'une sphère centrée sur A et d'un ellipsoïde de révolution dont les foyers sont A et B (voir le schéma page ci-contre).

UN DISPOSITIF OPTIQUE QUI VIOLE LA THERMODYNAMIQUE?

Tous les rayons issus de A et réfléchis sur la partie sphérique de la cavité reviennent vers A. Il s'ensuit que plus de la moitié des rayons qui partent de A y reviennent, donc que moins de la moitié atteignent B. De l'autre côté, tous les rayons émis par B et réfléchis sur l'ellipsoïde se focalisent au point A. Ainsi, plus



de la moitié des rayons partant de B arrivent sur A. Les sources A et B étant identiques et isotropes, on en déduit que A reçoit plus d'énergie que B.

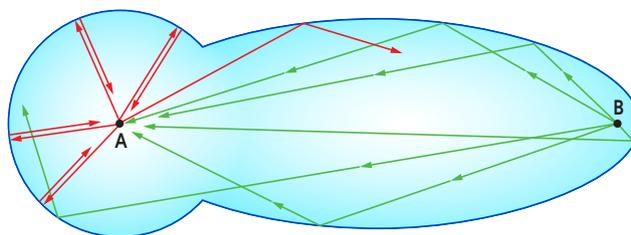
Roland Winston pointe alors un paradoxe si A et B sont des «corps noirs», censés absorber toute lumière incidente. Un tel corps émet une puissance lumineuse proportionnelle à T^4 , où T est sa température absolue. Si A et B sont initialement à la même température, le transfert d'énergie en faveur de A à l'œuvre dans le dispositif optique va briser cette égalité, et A deviendra plus chaud que B.

Ainsi, sans aucun travail, on aura pris de l'énergie à la source froide (B) pour la

UNE CAVITÉ OPTIQUE PARADOXALE

On considère une cavité en partie sphérique, en partie ellipsoïdale, aux parois réfléchissantes (ci-dessous, vue en coupe). Des points lumineux identiques sont placés aux foyers A et B de l'ellipsoïde, le point A étant aussi le centre de la sphère utilisée. On voit facilement que la plupart des rayons lumineux partant de A reviennent en A, et que la plupart des rayons lumineux partant de B aboutissent en A (dans une ellipse, un rayon partant d'un foyer aboutit à l'autre foyer). Ainsi, A recevrait plus d'énergie que B et sa température dépasserait donc celle de B, ce qui serait en contradiction avec les principes de la thermodynamique.

C'est l'hypothèse de sources lumineuses ponctuelles qui conduit à cette situation paradoxale. Les sources placées en A et B sont en réalité de taille non nulle, et les rayons qui ne partent pas strictement du point B n'atteignent pas A. Un calcul détaillé montre alors que les sources A et B reçoivent *in fine* la même énergie.



Dans les phares des voitures modernes, des dispositifs optiques concentrent la lumière en un faisceau bien profilé, qui éclaire mieux et éblouit moins.

donner à la source chaude (A), ce qui violerait le deuxième principe de la thermodynamique tel qu'énoncé par Rudolf Clausius: dans le dispositif en question, il est impossible de porter un objet à une température supérieure à celle de la source de chaleur qui lui apporte son énergie.

Comment résoudre ce paradoxe? Une première réponse réside dans la réalisation du dispositif. Les sources ne sont jamais ponctuelles: leur taille n'est pas nulle. Or en dehors des stricts foyers de l'ellipsoïde, les rayons émis par les autres points des sources ne convergent pas en un point. La plupart des rayons partant de B n'atteignent alors pas A. Les calculs

montrent alors que A et B reçoivent la même énergie, et que leurs températures restent par conséquent égales.

Pour en revenir à notre pastille, le second principe de la thermodynamique indique donc qu'elle ne pourra jamais dépasser les 5800 kelvins (environ 5500 °C) de la surface du Soleil. Ce qui, pour un corps noir à l'équilibre thermique, correspond à une puissance reçue de 6,32 kilowatts pour 1 centimètre carré. La puissance solaire au niveau de la Terre (avant la traversée de l'atmosphère) étant de 1,36 kilowatt par mètre carré, le facteur de concentration sera au plus d'environ 46000.

Sur le plan théorique, ces considérations sont liées à un principe optique qui met en jeu l'«étendue du faisceau».

L'ÉTENDUE D'UN PINCEAU LUMINEUX

Pour le faisceau issu d'une source très petite, cette grandeur est le produit de l'aire de la source par l'ouverture angulaire dans l'espace des rayons lumineux qui atteignent la surface réceptrice. Le >



Les auteurs ont dernièrement publié : **En avant la physique!**, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).

> principe optique stipule que cette «étendue» ne peut pas décroître le long du faisceau. Et en l'absence de diffusion de la lumière (comme on l'a supposé dans ce qui précède), elle se conserve. Parce qu'elle traduit l'information que l'on a sur le faisceau, elle est reliée à l'entropie, d'où le lien avec la thermodynamique.

Qu'est-ce que cela signifie pour notre expérience initiale? La pastille, qui constitue la surface réceptrice, peut absorber les rayons qui arrivent de toutes les directions. Si l'on veut que la surface qui collecte les rayons solaires soit bien plus grande que cette surface de réception, il faut réduire l'ouverture angulaire des rayons collectés. Dans notre cas, l'ouverture minimale correspond à la taille angulaire du Soleil. En appliquant le principe de conservation de l'étendue du faisceau, on obtient alors que le diamètre de la surface de collecte est 215 fois plus grand que celui de la pastille. Cela correspond à une aire de collecte $215^2 \approx 46\,000$ fois plus grande que l'aire de réception – le même facteur maximal de concentration que celui indiqué par la thermodynamique!

À LA RECHERCHE DU CONCENTRATEUR OPTIMAL

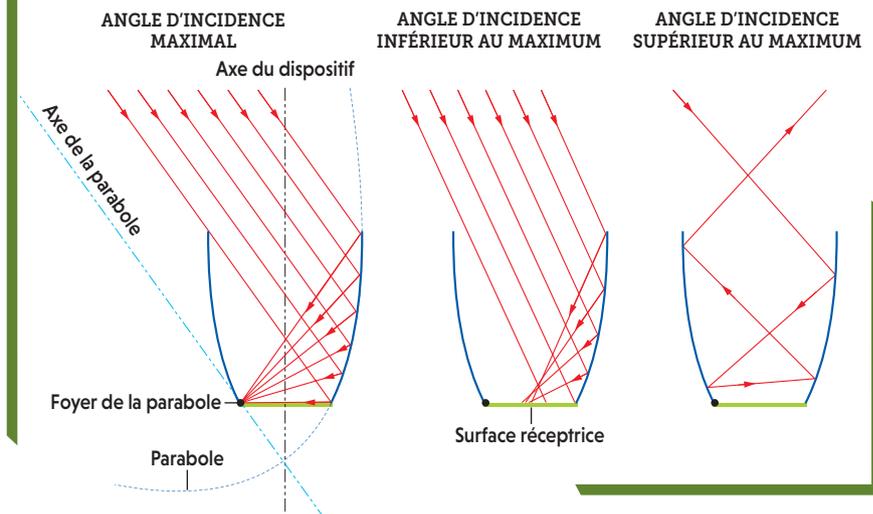
Il est possible de construire un collecteur qui tend vers cet optimum à l'aide de deux miroirs et en utilisant le «principe des rayons extrêmes». Prenons les rayons arrivant de gauche avec l'inclinaison maximale: on les focalise à l'extrémité gauche du récepteur grâce à un miroir parabolique dont le foyer coïncide avec cette extrémité (voir la figure ci-dessus). Les rayons arrivant de la droite sont collectés par un miroir symétrique. Le principe des rayons extrêmes assure que les rayons incidents d'inclinaison intermédiaire arriveront sur le récepteur.

Avec ce dispositif, nommé CPC (pour *compound parabolic concentrator*), l'ensemble des rayons provenant du Soleil et traversant la pupille d'entrée avec une inclinaison inférieure au maximum arrivent sur le récepteur de toutes les directions. Et des rayons qui franchiraient l'ouverture avec un angle d'incidence supérieur n'atteindraient pas le récepteur: ils se réfléchiraient plusieurs fois sur les parois avant d'être renvoyés vers l'extérieur.

Cependant, l'optimum suppose que le Soleil, le concentrateur et le récepteur soient alignés sur un même axe. Mais le Soleil se déplace dans le ciel... Pour des applications rudimentaires de chauffage ou de photovoltaïque, on peut se contenter de dispositifs fixes. Dans ce cas, le

CONCENTRATEURS PARABOLIQUES

Les dispositifs CPC (pour *compound parabolic concentrator*, «concentrateur parabolique composé») sont appelés des miroirs de forme parabolique. Un miroir parabolique focalise un faisceau de rayons parallèles à l'axe de la parabole sur le foyer de celle-ci. Dans un CPC, deux segments de parabole symétriques sont disposés de part et d'autre d'un axe central, le bas d'un segment parabolique coïncidant avec le foyer de l'autre parabole (voir la figure ci-dessous). Les rayons dont l'angle d'incidence est inférieur ou égal à celui de l'axe de la parabole sont renvoyés sur la surface réceptrice (schémas de gauche et du milieu). Ceux d'angle d'incidence supérieur sont réfléchis dans le dispositif et finissent par en sortir (schéma de droite).



facteur de concentration est faible; en moyenne, il se situe entre 1 et 4. S'ajuster à la hauteur moyenne du Soleil dans le ciel permet d'atteindre des facteurs de concentration d'environ 100, suffisants pour des centrales solaires thermiques à concentration, où le rayonnement solaire chauffe un fluide caloporteur.

Pour des concentrations plus fortes, il faut des héliostats, qui suivent la course du Soleil dans le ciel. Il reste toujours techniquement difficile d'atteindre des facteurs de concentration dépassant 10 000, qui n'ont d'intérêt que pour des fours solaires destinés par exemple à l'étude des matériaux aux températures extrêmes.

Les concentrateurs de lumière sont utiles dans bien d'autres situations: optimiser l'éclairage des phares, réaliser des puits de lumière qui amènent à l'intérieur d'un bâtiment la lumière du soleil, injecter le maximum de lumière dans une fibre optique... Ce qui est essentiel et que permet cette «optique non imageante», c'est de ne pas avoir de pertes d'énergie lumineuse. Pour une lampe torche, par exemple, c'est s'assurer que l'intégralité de la lumière émise par la lampe se retrouve dans le faisceau. Pour les phares de voiture, c'est d'avoir toute la lumière répartie selon un profil conçu pour éclairer au mieux la route, sans éblouir les autres conducteurs. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. Madala et R. F. Boehm, **A review of nonimaging solar concentrators for stationary and passive tracking applications**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 71, pp. 309-322, 2017.

R. Winston, **Thermodynamically efficient solar concentrators**, *Journal of Photonics for Energy*, vol. 2(1), article 025501, 2012.

W. T. Welford et R. Winston, **The ellipsoid paradox in thermodynamics**, *Journal of Statistical Physics*, vol. 28(3), pp. 603-606, 1982.

L'AUTEUR



HERVÉ LE GUYADER
professeur émérite de biologie
évolutive à l'université
Pierre-et-Marie-Curie, à Paris

L'ÉNIGME DES 7 VERTÈBRES

Pourquoi (presque) tous les mammifères ont-ils 7 vertèbres cervicales? Contrairement à ce que maints zoologistes ont longtemps cru, ce nombre n'apporte aucun avantage évolutif.

Os des membres, du crâne ou des ceintures reliant les membres à la colonne vertébrale... D'une espèce à l'autre, le squelette des mammifères actuels présente d'évidentes régularités, étudiées depuis plusieurs siècles par les médecins, vétérinaires et zoologistes. En particulier, la colonne vertébrale, qui abrite la moelle épinière, se compose de vertèbres réparties en cinq régions distinctes: cervicale, thoracique, lombaire, sacrée, caudale (voir l'encadré page 94). Chez l'homme, on compte 7 vertèbres cervicales (dont l'atlas et l'axis qui portent le crâne), 12 thoraciques munies d'une paire de côtes, 5 lombaires, 5 sacrées fusionnées en un os unique, le sacrum et, suivant les individus, 3 à 5 vertèbres caudales fusionnées en un coccyx.

Il n'échappe à personne que, chez les mammifères, le nombre total de vertèbres n'est pas identique d'un animal à l'autre, étant donné l'extrême variabilité de la longueur de la queue, et donc du nombre de vertèbres caudales. De plus, suivant les animaux, les vertèbres lombaires varient de 5 à 7, les thoraciques de 12 à 14. Mais,

comme l'a remarqué le naturaliste français Louis Daubenton au XVIII^e siècle, le nombre de vertèbres cervicales chez les mammifères reste fixé à 7. Il proposa même d'en faire une loi, jusqu'au moment où, désespéré, il découvrit que les lamantins (genre *Trichechus*) n'en ont que 6! Exit la loi de Daubenton, que les paresseux violent également: les unauis (à deux griffes sur les pattes antérieures, genre *Choloepus*) ont eux aussi 6 vertèbres cervicales, tandis que les aïs (à trois griffes, genre *Bradypus*) en présentent 9...

Regardons d'autres vertébrés tétrapodes. Chez les oiseaux, le nombre de cervicales varie entre 11 et 25. Ainsi, l'allongement du cou, comme chez le cygne ou le héron (*ci-contre à droite*), est dû à une augmentation du nombre de vertèbres. Le record, semble-t-il, est détenu par un plésiosaure marin qui vivait il y a environ 73,5 millions d'années, l'élasmosaure *Albertonectes vanderveldei*, avec 76 vertèbres cervicales! Une telle structure osseuse procure une souplesse étonnante au cou, souplesse qui fait défaut à la girafe, dont la tête ne repose que sur 7 vertèbres cervicales (*ci-contre, à gauche*). Ainsi, la comparaison avec les autres tétrapodes montre que, chez les

Pour amener le sang au cerveau, la pression artérielle de la girafe est deux fois supérieure à celle de l'homme. Des valvules empêchent le sang d'affluer au cerveau quand elle baisse la tête.

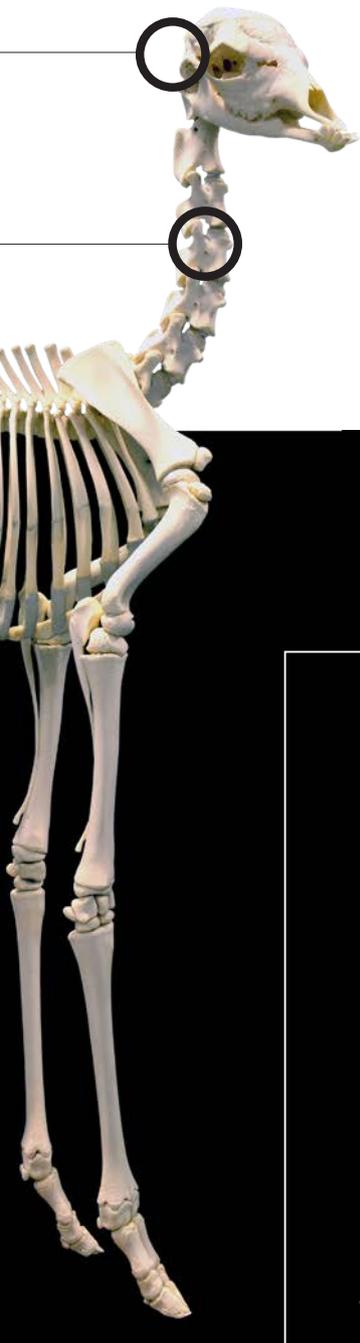
Comme la plupart des mammifères, dont l'homme, la girafe ne compte que 7 vertèbres cervicales, ce qui explique la raideur de son cou. Chaque vertèbre mesure environ 40 centimètres...



Girafe (*Giraffa camelopardalis*)
Taille: env. 5,7 m (du sol aux cornes)
Longueur du cou: env. 2,4 m



Héron pourpré (*Ardea purpurea*)
Taille: env. 90 cm (du bec à la queue)
Longueur du cou: env. 40 cm



EN CHIFFRES

25

vertèbres cervicales articulent l'harmonieux cou du cygne. C'est le maximum observé chez les oiseaux. Le minimum est trouvé chez les perroquets, avec 11 cervicales.

35,5 cm

C'est la longueur du cou de l'éléphant d'Asie dont le squelette est exposé dans la galerie d'anatomie comparée du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris. Le spécimen, qui mesure par ailleurs 2,57 mètres du prémaxillaire au bassin, est petit – sans doute une éléphante adulte.

7 m

C'est la longueur du cou d'*Albertonectes vanderveldei*, un plésiosaure qui vivait au Canada il y a quelque 73,5 millions d'années. Avec 76 vertèbres cervicales (sur 132), il détient le record du plus long cou articulé.

7 vertèbres cervicales à 6 ou à 9? La solution a été proposée à la fin du XIX^e siècle par l'un des pères de la génétique, le Britannique William Bateson. La différence essentielle entre une vertèbre cervicale et une thoracique est que cette dernière porte une paire de côtes. Bateson propose donc que le passage de 7 vertèbres cervicales à 6 ne soit pas dû à un changement du nombre total de vertèbres (élimination d'une cervicale), mais à la transformation d'une cervicale en thoracique, par adjonction d'une paire de côtes à la dernière cervicale, qui prend alors l'aspect d'une thoracique.

Bateson a appelé un tel changement une homéose, que l'on peut définir ainsi: l'homéose est l'apparition d'un caractère «normal» (une vertèbre avec des côtes) à un endroit «anormal» (à la septième place de la colonne vertébrale). Le raisonnement s'applique au passage de 7 vertèbres cervicales à 9: cette fois, on a des vertèbres cervicales là où l'on attendrait des thoraciques.

UNE PAIRE DE CÔTES EN PLUS

Des cas de telles variations homéotiques ont été décrits chez l'homme. Certains individus naissent avec «une paire de côtes supplémentaire», comme on le disait auparavant, que l'on peut traduire par «une transformation homéotique de la septième cervicale en thoracique». Un tel changement est associé à des pathologies: ces côtes surnuméraires compriment les nerfs du plexus brachial, à la base du cou, et l'artère subclavière, entraînant des symptômes dégénératifs sévères du bras.

En se penchant sur cette curiosité anatomique, les médecins se sont rendu >

mammifères, la conservation du nombre de vertèbres cervicales est une réelle originalité, qui demande explication.

Première idée qui vient à l'esprit: avoir 7 vertèbres cervicales apporterait un avantage, qui aurait été sélectionné au fil de l'évolution. Nombre de zoologistes se sont creusé la tête pour trouver un tel avantage. En réalité, ils en ont trouvé un pour... les 9 vertèbres cervicales des aïes qui, grâce à elles, réalisent des mouvements de la tête de 270°, tout comme la chouette chevêche, l'attribut d'Athéna.

Deuxième idée, plus élaborée: examiner la variabilité du caractère. Comment interpréter biologiquement le passage de

Le squelette du héron pourpré comporte 16 vertèbres cervicales, ce qui confère à son cou une grande souplesse. L'oiseau se sert ainsi de son bec comme d'une lance projetée par son cou.

> compte qu'elle est corrélée à d'autres pathologies plus graves: des cancers précoces de l'enfant. Une première analyse de la fin du siècle dernier montre que 33% des nourrissons atteints d'un neuroblastome présentent des côtes surnuméraires. C'est pourquoi, en 1999, une équipe médicale néerlandaise a radiographié systématiquement les nouveau-nés et les fœtus décédés à l'hôpital d'Amsterdam. Les résultats sont implacables: 78% des fœtus pour lesquels des côtes surnuméraires avaient été détectées sont morts avant la naissance, et 83% avant l'âge de un an. De plus, 25% des cas portant des côtes surnuméraires avaient développé des tumeurs. De leurs données, les chercheurs ont déduit que des enfants avec des côtes surnuméraires ont 12% de risque de développer un cancer, soit 120 fois plus que la population générale.

UN GÈNE, PLUSIEURS TRAIT'S

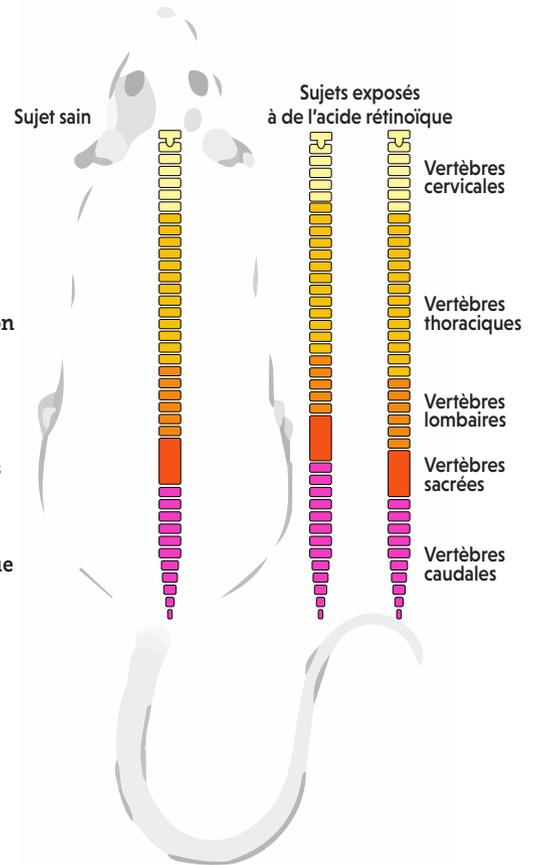
Cette étude montre où est la sélection: elle ne porte pas sur le nombre de vertèbres, mais sur la susceptibilité aux cancers précoces. Il s'agit maintenant de comprendre comment ces deux caractères *a priori* indépendants se trouvent corrélés. C'est ici que l'analyse de Bateson est fondamentale: une paire de côtes supplémentaire, c'est une transformation homéotique. Or la génétique du développement de ces dernières décennies a montré qu'une telle transformation est le résultat d'une mutation de gènes que l'on a qualifiés pour cela d'homéotiques, les gènes *Hox*. En effet, on sait depuis plus de vingt ans que l'ordonnance du corps d'un animal à symétrie bilatérale suivant son axe antéropostérieur dépend du profil d'expression de différents gènes *Hox* (voir l'encadré ci-dessus).

Par ailleurs, dans les années 1990, diverses études ont montré que les gènes *Hox* sont aussi impliqués dans la prolifération de lignées cellulaires chez l'homme et la souris: pas moins de 20 gènes *Hox* interviennent ainsi dans la prolifération et la différenciation de cellules souches sanguines. De plus, des changements dans l'expression de certains de ces gènes sont corrélés à l'apparition de différents types de cancer, en particulier des neuroblastomes et des leucémies.

On a ici affaire à un cas de «pléiotropie», une caractéristique génétique connue depuis bien longtemps. Forcé en 1910 par le zoologiste allemand Ludwig Plate, ce terme désigne le fait qu'un gène peut déterminer plusieurs caractères, qui apparaissent alors corrélés – dans notre

DES GÈNES HOX AUX VERTÈBRES

En 1991, des chercheurs de l'institut Max-Planck de Göttingen ont réussi à changer les limites d'expression de certains gènes *Hox* en exposant des embryons de souris à des doses massives d'acide rétinoïque. Ces modifications étaient accompagnées, quelques jours plus tard, de transformations homéotiques: chez certains embryons, par exemple, une vertèbre cervicale était devenue thoracique, et le changement s'était répercuté jusqu'à la queue (au centre); chez d'autres, une lombaire s'était transformée en thoracique, et la modification s'était aussi répercutée (à droite). D'autres travaux ont ensuite confirmé que c'est bien la combinaison de gènes *Hox* activés qui spécifie le phénotype des vertèbres.



cas le nombre de vertèbres cervicales et le risque de développer un cancer.

On retrouve un thème cher de l'évolutionniste américain Stephen Jay Gould. Par le terme «programme adaptatif», il raillait ses collègues qui cherchaient obstinément la sélection ayant amené à tel ou tel caractère qui aurait contribué à une meilleure adaptation d'un organisme donné. En fait, il est inutile de chercher une adaptation derrière ce nombre mythique de 7 cervicales.

Pourquoi n'a-t-on pas l'équivalent chez les oiseaux? L'incidence des cancers y est bien moindre, pour des raisons encore obscures. Mais on sait que les cancers aviens sont surtout dus à des virus, l'exemple le plus connu étant celui du sarcome de Rous.

Naturellement, il convient aussi d'expliquer les exceptions. Une hypothèse est proposée pour les paresseux et les lamantins: ces derniers présentent un métabolisme basal très bas, allié à une activité réduite comparée à celle des autres mammifères. L'oxydation qui s'ensuit dans les cellules, altérant l'ADN, s'en trouverait diminuée, entraînant une faible susceptibilité aux cancers, ce que des études épidémiologiques semblent corroborer. Il n'y a pas d'études sur les paresseux, mais, sur 800 lamantins de la Caraïbe autopsiés, pas un seul n'a développé un cancer. ■

BIBLIOGRAPHIE

I. Varela-Lasheras *et al.*, **Breaking evolutionary and pleiotropic constraints in mammals: On sloths, manatees and homeotic mutations**, *EvoDevo*, vol. 2, article 11, 2011.

F. Galis *et al.*, **Extreme selection in humans against homeotic transformations of cervical vertebrae**, *Evolution*, vol. 60(12), pp. 2643-2654, 2006.

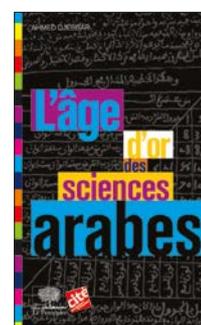
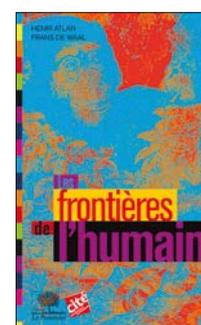
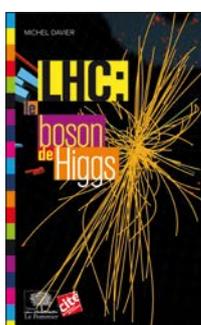
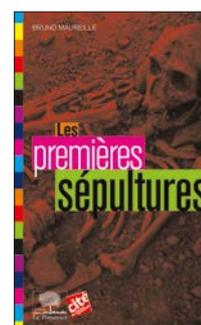
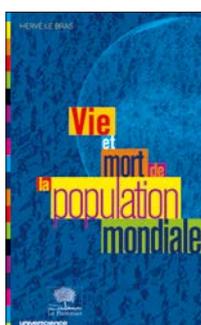
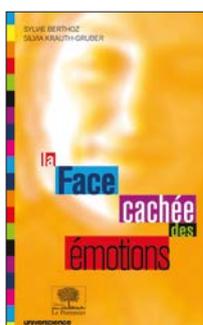
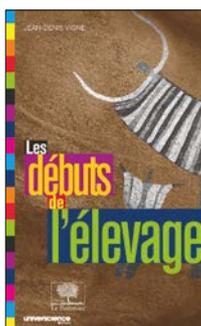
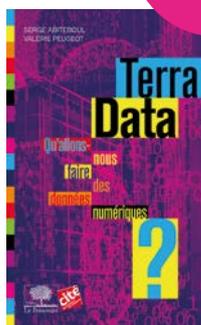
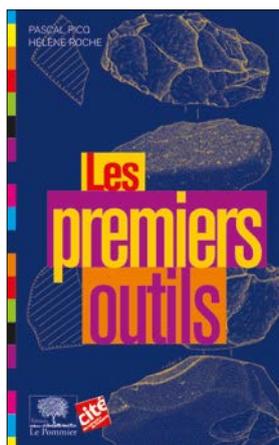
Y. Narita et S. Kuratani, **Evolution of the vertebral formulae in mammals: A perspective on developmental constraints**, *J. Exp. Zool.*, vol. 304B, pp. 91-106, 2005.

F. Galis, **Why do almost all mammals have seven cervical vertebrae? Developmental constraints, Hox genes, and cancer**, *J. Exp. Zool.*, vol. 285, pp. 19-26, 1999.

Les chercheurs d'aujourd'hui nous livrent l'état de leurs savoirs.

Une coédition
Le Pommier / Cité des sciences

Nouveautés
2017



Retrouvez toutes nos nouveautés www.editions-lepommier.fr
et le catalogue d'Universcience universcience.fr/editions

L'AUTEUR



HERVÉ THIS
physicochimiste,
directeur du Centre
international de
gastronomie moléculaire
AgroParisTech-Inra, à Paris.

FEUILLETAGES ÉVANESCENTS

Un peu de combinatoire permet de faire des pâtes feuilletées variées, plus ou moins diaphanes, qui sont ajustées au goût de chacun et à la préparation désirée.

Classiquement, les pâtes feuilletées se font avec six repliements en trois, ce que l'on nomme des «tours simples», mais les pâtisseries utilisent parfois aussi des «tours doubles», où l'on replie en quatre, comme un portefeuille. Quelles pâtes peut-on obtenir en mêlant ces tours? Et peut-on faire plus croustillant qu'une pâte feuilletée classique?

Examinons la pâte classique directe à six tours simples. On part de farine de blé, à laquelle on ajoute de l'eau, afin de faire une pâte lisse et qui ne colle pas... On étale la boule de pâte sur un plan de travail fariné, puis on dépose, au centre de cette galette de pâte, du beurre, environ la même masse que de farine. On replie la pâte sur le beurre, afin de faire comme une enveloppe contenant une lettre.

On obtient ainsi une couche de beurre entre deux couches de pâte. Vient alors le premier tour simple: on étend ce système de sorte qu'il soit trois fois plus long que large, et l'on replie en trois. Repos, puis un deuxième tour simple: on tourne le pâton d'un quart de tour, et l'on étend trois fois plus long que large, avant de replier en trois. Nouveau repos, au frais s'il fait chaud, puis deux autres tours. Et encore deux autres tours. On comptera facilement que l'on obtient ainsi 730 couches de pâte intercalées de 729 couches de beurre. Au fait, pourquoi ne pas avoir plié seulement en deux? Parce que le nombre de feuilles aurait augmenté plus lentement: après six tours, on n'aurait que 64 feuilles.

On peut aller plus vite avec des tours doubles (on étend quatre fois plus long que large, et on replie les extrémités jusqu'au milieu, avant de replier en deux). C'est

Un premier
«tour simple»
produit 4 couches
de pâte, séparées
par 3 couches
de beurre.



notamment ce qu'on fait pour la «pâte feuilletée inversée» où, cette fois, le pâton de farine est posé sur une couche de beurre.

Pourquoi s'arrêter à six tours simples, et ne pas poursuivre jusqu'à sept ou huit tours simples? Nous avons testé cela... avec un résultat inattendu. Tout d'abord, l'épaisseur des pâtes feuilletées augmente avec le nombre de tours, c'est-à-dire avec le nombre de feuilles. Pourquoi, alors, l'empirisme s'est-il arrêté aux six tours classiques? La dégustation l'explique: avec des feuilletages à un, deux, trois ou quatre tours simples, la pâte est plus croquante que croustillante, difficile à couper. Puis, avec cinq ou six tours, la croustillance s'impose. Et avec sept tours, elle est parfaite... mais seulement pour les premiers mouvements de mastication, car, bientôt, la salive élimine la sensation croustillante des feuilles très minces.

D'un petit mal, faisons un bien, en se souvenant de ces «cristaux de vents», des sortes de meringues que j'ai proposé de produire à partir d'une mousse de blanc d'œuf additionnée de liquide. Quand on augmente beaucoup la quantité de liquide, on obtient des objets qui s'effondrent en bouche et ne laissent que le goût du liquide.

Il y a une sorte de «diaphanéité» dans ces objets... et c'est ce que l'on peut obtenir en ne s'arrêtant pas à sept tours, mais en poursuivant jusqu'à huit ou neuf.

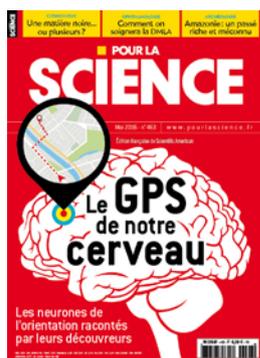
Pourquoi se limiter aux seuls tours simples, ou aux seuls tours doubles? Avec des mélanges de repliement en deux, de tours simples et de tours doubles, on obtient une grande variété de nombres de feuilles: 2, 3, 4, 6, 8, 9, 12, 16, 18, 24, 27, 32, 36, 48, 54, 64, 72, 81, 96, 108, 128, 144, 162, 192, 216, 243, 256, 288, 324, etc. À chacun de choisir sa combinaison, pour les sensations gustatives qu'il doit produire, dans un environnement culinaire déterminé: pour une tarte aux abricots, on fera sans doute différemment que pour une bouchée à la reine ou un feuilleté au fromage. ■

LA RECETTE



- 1 À 200 grammes de farine, ajouter du sel et de l'eau, en travaillant jusqu'à obtenir une pâte qui ne soit pas collante.
- 2 L'étaler en galette carrée de un centimètre d'épaisseur.
- 3 Déposer dessus 150 grammes de beurre malaxé, en galette carrée plus petite, tournée de un huitième de tour.
- 4 Replier la pâte sur le beurre pour faire une enveloppe.
- 5 Sept fois de suite, sur un plan de travail fariné, étendre trois fois plus long que large (en faisant bien attention à appuyer très régulièrement) et replier en trois.
- 6 Abaisser selon les besoins culinaires, couper les bords à l'aide d'un couteau très tranchant (pour ne pas souder les feuilletés) et cuire à 180 °C pendant environ 30 minutes.

DÉCOUVREZ LES ARCHIVES DE **POUR LA SCIENCE**



RETROUVEZ TOUS LES NUMÉROS DEPUIS 1996

COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION SUR www.pourlascience.fr



A

PICORER



Retrouvez tous nos articles sur www.pourlascience.fr

P.54

E. T.

Pour détecter une vie extraterrestre évoluée, cherchons un signal infrarouge, a proposé le physicien Freeman Dyson dans les années 1960, imaginant qu'elle exploiterait l'énergie de son étoile en l'entourant de panneaux solaires géants. On cherche toujours...

P.92

COU RELATIF

Comme la plupart des mammifères, dont l'homme, la girafe ne compte que 7 vertèbres cervicales, pour un cou de 2,4 mètres environ, ce qui explique la raideur de ce dernier. Chaque vertèbre mesure environ 40 centimètres, soit à peu près la longueur totale du cou du héron pourpré... ou de l'éléphant.

P.7

«*Quand l'OMS a voulu, dans les années 1950-1960, éradiquer le paludisme à grand renfort de DDT, on a juste réussi à sélectionner des moustiques résistants à cet insecticide.*»

FRÉDÉRIC DARRIET
entomologiste médical à l'IRD de Montpellier

P.17

2D

Des aimants constitués d'une seule couche d'atomes ont été fabriqués à partir de triiodure de chrome (CrI₃).

P.62

570 HZ, 200 DB

Telles sont les caractéristiques du bruit que produisent les crevettes pistolets dans l'eau. Un peu comme si elles jouaient un ré aigu plus fort que *fortissimo* au piano. Ces sons aident les larves de certains poissons à s'orienter vers les récifs coralliens. La mer, un havre de silence?

P.80

LAPINS

Un homme met un couple de bébés lapins dans un lieu isolé de tous côtés par un mur. Combien de couples obtient-on en un an si chaque couple engendre tous les mois un nouveau couple à compter du troisième mois de son existence? 144, répond Leonardo Fibonacci!

P.70

100 M

C'est la hauteur maximale des arbres, tirillés entre leur besoin de pomper l'eau jusqu'aux plus hautes feuilles par transpiration foliaire et la gravité, qui tire l'eau vers le bas. La compétition de ces deux mécanismes conditionne cette limite...

**IMAGINÉE PAR LES ÉCRIVAINS,
RÉALISÉE PAR LES PLUS GRANDES NATIONS ...**

LA CONQUÊTE DE L'ESPACE FAIT TOUJOURS RÊVER

Jean-François Clervoy, astronaute,
et **Frank Lehot**, médecin et instructeur des vols
en apesanteur, racontent ici l'histoire fantastique
de l'homme dans l'espace, ponctuée d'anecdotes
originales et de témoignages inédits sur le
quotidien des astronautes.
Hôtels en orbite, conquête de Mars, exploitation
des ressources extraterrestres, ascenseur
spatial... L'aventure ne fait que commencer !

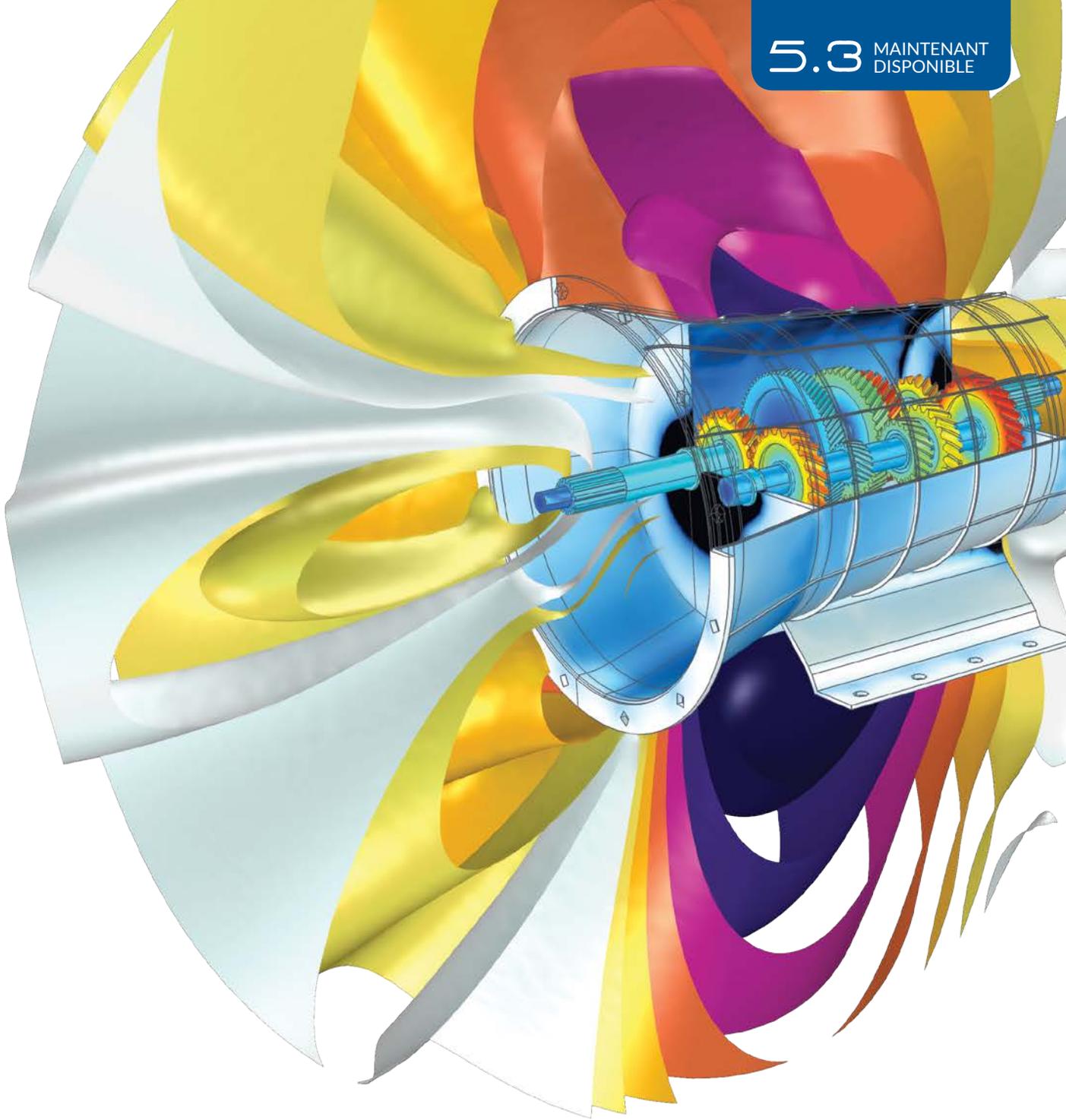


ISBN 9782807315105 - 2^e éd. 2017 - 224 pages - 25 €

Superbe iconographie tout en couleurs

En librairie et sur
www.deboecksuperieur.com

deboeck
SUPÉRIEUR **B**



LA MULTIPHYSIQUE POUR TOUS

avec COMSOL Multiphysics®

Les outils de simulation numérique
viennent de franchir une étape majeure.

Dépassez les défis de la conception avec COMSOL Multiphysics®. Avec ses puissants outils de modélisation et de résolution, obtenez des résultats de simulation précis et complets.

Développez des applications personnalisées à l'aide de l'Application Builder, et déployez-les au sein de votre organisation et auprès de vos clients partout dans le monde, avec une installation locale de COMSOL Server™.

N'attendez plus. Bénéficiez de la puissance des simulations multiphysiques.

comsol.fr/products