

SCIENCE

ASTROPHYSIQUE
**DES TROUS NOIRS
TROP GROS POUR
LEUR ÂGE ?**

ÉVOLUTION
**L'ADN PERDU
QUI A FAIT
L'HOMME**

BIOPHYSIQUE
**LE SECRET DE
LA FORME DES
COQUILLAGES**

SEPTEMBRE 2018
N° 491

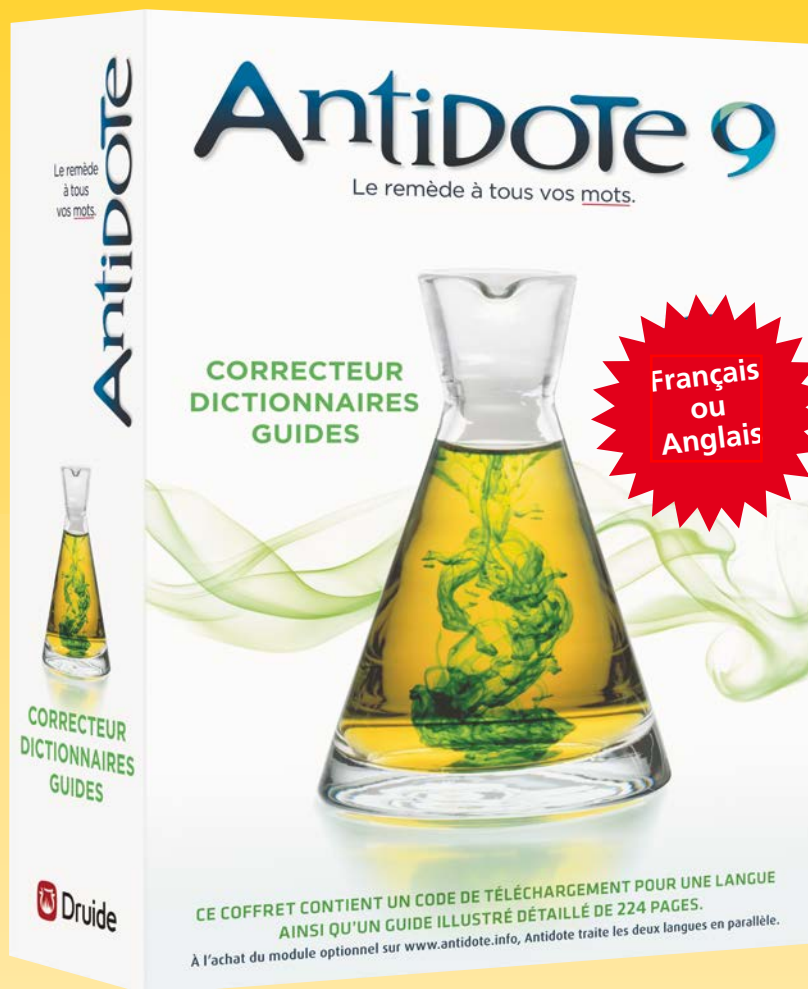


CERVEAU ET IMMUNITÉ

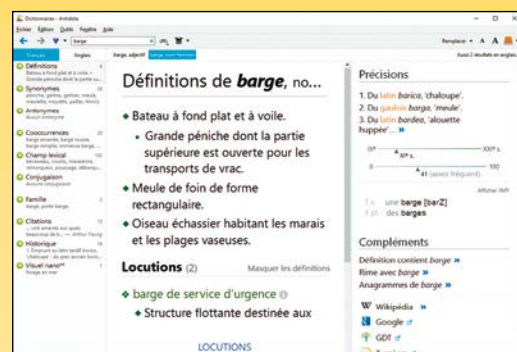
UN DIALOGUE INSOUÇONNÉ



Antidote 9 Correcteur ou dictionnaire ? Les deux. Et plus encore.



▲ Le correcteur souligne d'un trait les fautes. En pointant sur une erreur surgit l'explication résumée du problème. On peut accéder directement à la section détaillée du guide linguistique concerné ou bien, en cliquant sur le mot, appliquer la correction suggérée.



▲ Le dictionnaire des définitions s'affiche en deux colonnes : au centre, les définitions proprement dites, riches en exemples ; à droite, les flexions du mot, son étymologie et un lien direct à Wikipédia. Le bandeau de gauche donne un accès immédiat à toute la richesse lexicographique d'Antidote 9.

Pour le français ou pour l'anglais, selon le choix fait à l'installation, Antidote 9 réunit un correcteur de nouvelle génération, des dictionnaires avec recherche puissante et des guides linguistiques clairs et détaillés. Le correcteur vérifie tout le texte en bloc : il y détecte les erreurs d'orthographe, de grammaire, de typographie et pointe sur les problèmes de style comme les répétitions. Des définitions aux synonymes, des cooccurrences aux étymologies, les dictionnaires offrent une référence lexicale d'une richesse et d'une cohésion inédites. Enfin, les guides linguistiques couvrent les sujets pertinents à l'écriture de la grammaire à la ponctuation, du lexique à la syntaxe. Antidote, c'est la façon moderne, rapide et pratique d'écrire sans faute et avec les mots justes.



▲ Rédigés dans un style accessible, les guides linguistiques décrivent les règles et les conventions et les illustrent avec des exemples. Les articles sont structurés en thèmes et sous-thèmes, afin d'appréhender rapidement l'ensemble d'une problématique.

Je désire recevoir une documentation gratuite sur Antidote 9 :

Je suis : ☐ utilisateur ☐ revendeur

Nom	Courriel
Fonction	Société
Adresse	
Code postal	Ville
Tél.	Fax



Certifié PEFC

Ce produit est issu
de forêts gérées
durablement et de
sources
contrôlées.

10-31-1282

pefc-france.org

**E
DITO**



**MAURICE
MASHAAL**
Rédacteur
en chef

LE TOUT, C'EST QUE LES PARTIES DIALOGUENT

Le corps humain est d'une très grande complexité, comme le sont d'ailleurs tous les organismes vivants. Que faire pour comprendre son fonctionnement? L'une des premières étapes est de repérer les principales parties qui composent le tout. Une tâche à peu près accomplie: on connaît aujourd'hui assez bien (mais imparfaitement tout de même...) l'anatomie humaine, où l'on distingue le système nerveux central, l'appareil digestif, le réseau sanguin, etc.

Une deuxième phase consiste à étudier chacune des parties de l'ensemble. Pour le corps humain, cette phase entamée depuis longtemps est encore loin de s'achever. C'est en particulier le cas pour les deux composants les plus complexes de notre organisme, le cerveau et le système immunitaire. Et pour compliquer encore la situation, les différents organes ne fonctionnent pas indépendamment, mais interagissent, parfois étroitement. Ce qui nécessite une troisième phase d'études difficiles – probablement une bonne partie des recherches biomédicales menées aujourd'hui.

Or pour le cerveau et le système immunitaire, les chercheurs ont longtemps pensé que leur interaction était négligeable, sauf en cas de lésions ou de maladie, grâce à la barrière hématoencéphalique qui isole bien le cerveau. Ce dogme s'effondre, explique le neuro-immunologiste Jonathan Kipnis (*voir pages 28 à 37*). Les découvertes récentes indiquent, de façon surprenante, des échanges entre système immunitaire et cerveau, l'un renseignant l'autre par le biais d'une circuiterie qui se dévoile peu à peu. Et par cette interaction le système immunitaire modifierait le comportement de l'individu.

Le cerveau et l'immunité dialoguent ainsi, pour le bien du corps entier. Autrement dit, pour que le tout fonctionne correctement, les parties doivent dialoguer. Cette leçon pourrait aussi s'appliquer aux sociétés et aux États, où souvent les monologues dominent! ■

SOMMAIRE

N° 491 /
Septembre 2018



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
www.pourlascience.fr

ACTUALITÉS

P. 6

ECHOS DES LABOS

- Les blazars, sources de neutrinos de haute énergie
- Les masques antipollution sont inefficaces
- Des hominiens en Chine il y a 2,1 millions d'années?
- Le centre de la Voie lactée sous l'œil de MeerKAT
- Le Mali, berceau de la domestication du riz africain
- La fin de l'Éocène et les gaz à effet de serre
- Un demi-million d'années de sapiens
- Le sexe engendre les sexes
- Les médailles Fields 2018

P. 20

LES LIVRES DU MOIS

P. 22

AGENDA

P. 24

HOMO SAPIENS INFORMATICS

Sauriez-vous ouvrir la porte de l'avion?
Gilles Dowek

P. 26

CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES

Quand la voiture était écologique
Gérald Bronner

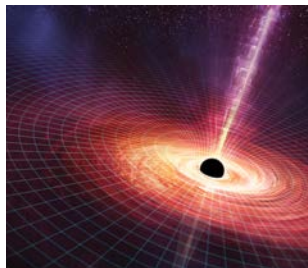


En couverture :
© Shutterstock.com/Jolygon, molekuul_be, matsabe

Les portraits des contributeurs sont de Seb Jarnot

Ce numéro comporte un encart abonnement Rue des Étudiants sur une sélection d'abonnés France Métropolitaine.

GRANDS FORMATS



P. 38

ASTROPHYSIQUE

LE PARADOXE DES JEUNES QUASARS

Priyamvada Natarajan

Des trous noirs supermassifs occupent le centre des quasars les plus anciens, objets nés moins de un milliard d'années après le Big Bang. Mais les astrophysiciens ignorent comment ces trous noirs ont pu grandir autant en si peu de temps. Une énigme qu'un scénario récemment proposé pourrait résoudre.



P. 44

ARCHEOLOGIE

LE VIEUX GÉNIE DES EAUX DU DÉSERT

J. Berking, B. Schütt, W. Bebermeier et S. Schmid

Les populations du passé savaient gérer avec efficacité les maigres ressources en eau des régions arides. Leurs techniques pourraient servir de modèles à une exploitation durable du précieux liquide.



P. 50

BIOPHYSIQUE

COMMENT LES COQUILLAGES ACQUIÈRENT LEUR FORME

Derek E. Moulton, Alain Goriely et Régis Chiriac

Spirales, épines, surfaces côtelées... : les coquilles des mollusques ont des géométries complexes et d'une étonnante régularité. Comment ces formes sont-elles produites? La modélisation mathématique montre que quelques processus mécaniques simples suffisent à engendrer les caractères observés.

Pages 77 à 80

CAHIER SPÉCIAL 60 ANS

LA DAM, DES EXPERTS SCIENTIFIQUES POUR LA DÉFENSE ET LA SÉCURITÉ NATIONALES

En partenariat avec



Direction des
Applications
Militaires



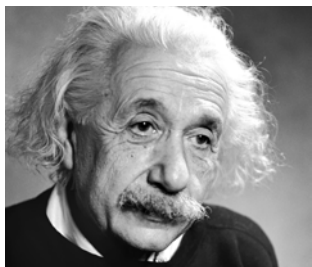
P.58

EVOLUTION

L'ADN PERDU QUI A FAIT L'HOMME

Philip L. Reno

Cerveau volumineux, posture debout, stratégie reproductive favorisant le couple... Ces caractéristiques des humains seraient apparues grâce à la disparition, au fil de l'évolution, de fragments clés de notre génome.



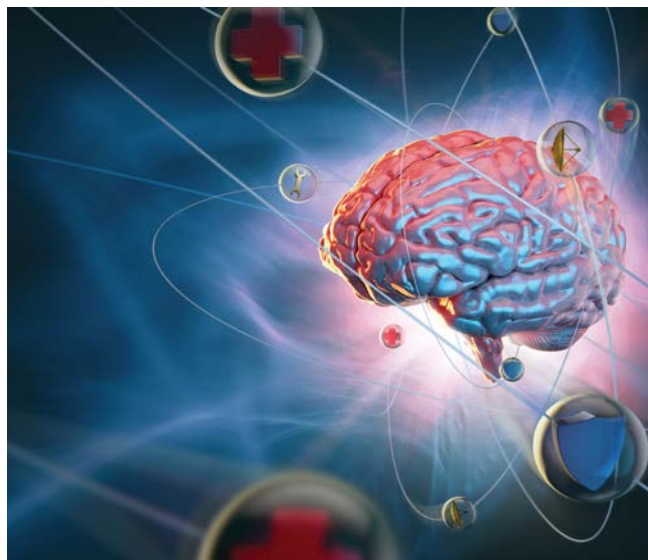
P.68

HISTOIRE DES SCIENCES

EINSTEIN, NEWTON, PASTEUR... N'ÉTAIENT PAS DES SAINTS

Yannick Fonteneau

Einstein n'était pas un saint, et Newton était manipulateur et ésotérique. Pourquoi sommes-nous si déçus de l'apprendre? Pour le comprendre, il faut remonter au XVII^e siècle, quand la figure du savant a commencé à jouer un rôle politique.



P.28

NEUROBIOLOGIE

CERVEAU ET IMMUNITÉ UN DIALOGUE INSOUÇONNÉ

Jonathan Kipnis

La relation entre le cerveau et le système immunitaire? Inexistante, pensait-on, sauf dans des cas pathologiques. Or on découvre que les deux systèmes sont intimement liés. Une connexion qui aurait une influence sur l'apprentissage et le comportement social.

RENDEZ-VOUS

P.82

LOGIQUE & CALCUL

L'UNIVERS ET LA MORALE VUS PAR LA THÉORIE DU CALCUL

Jean-Paul Delahaye

Si l'on considère toute interaction physique comme une sorte de calcul, on est amené à repenser l'évolution de l'Univers, voire à donner des fondements computationnels à l'éthique.



P.88

ART & SCIENCE

Lisez-vous le rongorongo?

Loïc Mangin

P.90

IDÉES DE PHYSIQUE

Faire d'un smartphone un microscope performant

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

P.94

CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION

La levure de boulanger vient de Chine

Hervé Le Guyader

P.97

SCIENCE & GASTRONOMIE

Poupées russes de liquides et de solides

Hervé This

P.98

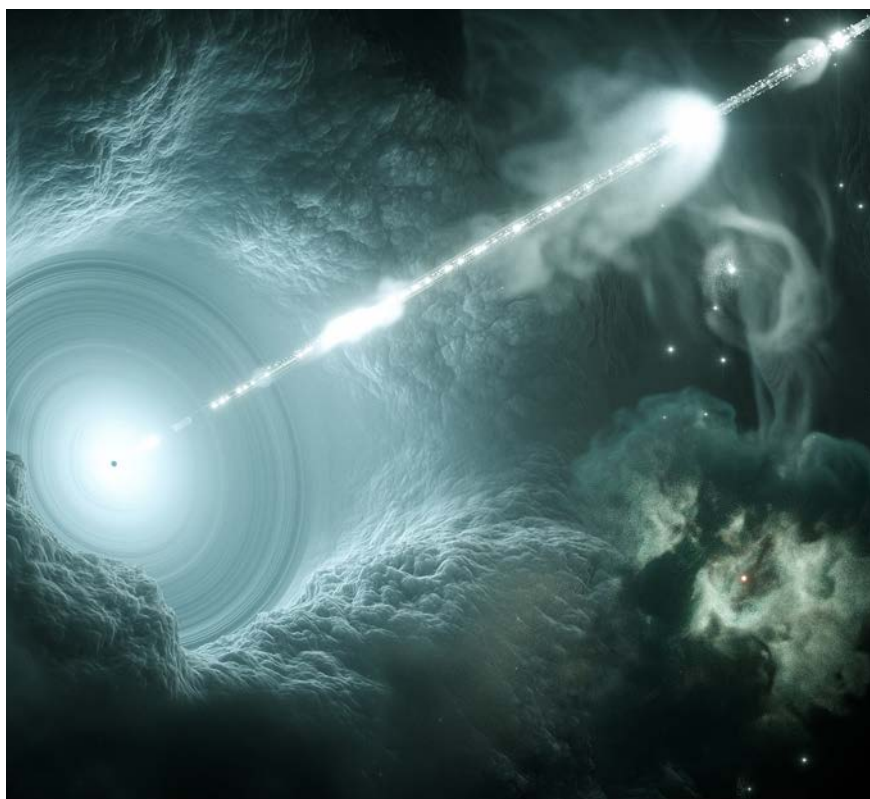
APICORER

A

CTUALITÉS

P.6 Échos des labos
P.20 Livres du mois
P.22 Agenda
P.24 Homo sapiens informaticus
P.26 Cabinet de curiosités
sociologiques

LES BLAZARS, SOURCES DE NEUTRINOS DE HAUTE ÉNERGIE



Vue d'artiste d'un blazar. Le jet de particules de haute énergie éjecté du disque d'accrétion comprend notamment des photons et des neutrinos.

En 2017, l'observatoire IceCube, en Antarctique, a détecté un neutrino de haute énergie. Il proviendrait d'une galaxie d'un type particulier située à plus de 4 milliards d'années-lumière.

A chaque instant, un flux constant de particules bombarde la Terre. Parmi celles-ci, les neutrinos font l'objet de nombreuses recherches. Depuis leur première détection en 1956, de nombreux observatoires ont été construits pour étudier ces particules. Ils ont permis de localiser deux sources de neutrinos de basse énergie (d'au plus quelques dizaines de mégaélectronvolts) en dehors de la Terre: le Soleil et la supernova SN1987a. Mais d'où proviennent les neutrinos de haute énergie? L'hypothèse

la plus probable est qu'ils acquièrent leur énergie dans des objets astrophysiques extrêmement massifs.

Le 22 septembre 2017, des physiciens de l'observatoire IceCube, situé en Antarctique, ont détecté un neutrino d'énergie supérieure à 290 téraélectronvolts. Cette énergie est plus de 20 fois celle atteinte dans les collisions proton-proton au grand collisionneur de hadrons (LHC) du Cern. La combinaison de nombreuses observations effectuées auprès de différents télescopes a permis d'identifier la source de ce neutrino: il s'agit du blazar TXS0506+056, situé à

plus de 4 milliards d'années-lumière de la Terre.

Les blazars sont des galaxies dites actives dont le centre est occupé par un trou noir supermassif, autour duquel spirale la matière d'un disque d'accrétion. Une partie de cette matière en orbite est éjectée sous la forme de deux jets perpendiculaires au plan du disque. Ils contiennent divers types de particules émises à des vitesses proches de celle de la lumière: photons, électrons, positrons, etc. En période d'éruption, les blazars émettent notamment des rayons gamma (des photons d'énergie supérieure au gigaélectronvolt, détectables par des télescopes spécialement conçus à cette fin), et probablement des neutrinos de haute énergie.

L'idée du projet IceCube – cet observatoire est en service depuis 2010 – est

d'utiliser la glace de la calotte antarctique comme détecteur. En effet, quand un neutrino traverse la Terre, il n'a qu'une très faible chance d'interagir avec la matière. Si une telle interaction se produit, elle engendre une particule chargée, qui peut être un muon (une sorte d'électron plus lourd et instable). Lorsque le muon de haute énergie traverse la glace à une vitesse supérieure à celle de la lumière dans ce milieu, il émet de la lumière bleue, nommé rayonnement Tcherenkov, sous la forme d'un cône. La détection de ce rayonnement par les modules optiques d'*IceCube* permet de reconstruire la direction de propagation du muon et, par extension, la direction du neutrino initial.

Cette direction donne une indication sur la position de la source du neutrino. Pour confirmer cette identification, on fait de l'«astronomie multimessagers»: on combine les observations portant sur les émissions électromagnétiques (les photons) à celles portant sur les neutrinos. En effet, les sources possibles de ces neutrinos, par exemple les blazars en période d'éruption, émettent aussi un rayonnement électromagnétique intense. Les photons comme les neutrinos se propagent en ligne droite jusqu'à la Terre et donc indiquent leur lieu d'origine. Un dispositif d'alerte permet aux différents observatoires au sol et dans l'espace de signaler toute observation qui pourrait compléter les données collectées par *IceCube*.

Lors de la détection du neutrino, le 22 septembre 2017, le détecteur LAT du télescope spatial *Fermi* a enregistré un signal gamma intense provenant du blazar TXS0506+056, dont la provenance coïncide avec la direction calculée pour le neutrino d'*IceCube*. Dans les jours qui ont suivi cette annonce, une quinzaine de télescopes ont scruté le blazar sur la plus large gamme de fréquences possible pour caractériser au mieux son spectre d'émission électromagnétique. L'ensemble des données recueillies suggère fortement que le blazar émet aussi des protons de très haute énergie. Or de tels protons sont présents dans le rayonnement cosmique, sans que l'on connaisse leurs sources et les mécanismes qui les accélèrent autant. Grâce au neutrino détecté par *IceCube*, les blazars pourraient constituer une partie de la réponse à ces interrogations. ■

LUCAS STREIT

Science, vol. 361,
article eaat1378, 2018

Masques antipollution, une inefficacité démontrée

Depuis quelques années, le marché des masques antipollution se développe en France, et rencontre son plus gros succès auprès des cyclistes. L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) vient cependant de conclure à l'inefficacité de tels dispositifs. Maria Neira, de l'OMS, fait le point.



Propos recueillis par CORALINE MADEC

MARIA NEIRA
médecin et directrice
d'un département
de santé publique et de
l'environnement à l'OMS

**Que désigne-t-on par le terme
« pollution atmosphérique » ?**

Ce terme générique regroupe divers contaminants : des particules fines en suspension dans l'air aux gaz tels que l'ozone (O_3), le dioxyde de soufre (SO_2), les oxydes d'azote (NO_x), etc. Si cette pollution (définie par des seuils) peut être d'origine naturelle, la majorité des émissions, en constante augmentation depuis dix ans, sont dues aux activités anthropiques (incinération des déchets, certains processus industriels, transport et production d'énergie). Aujourd'hui, on estime que 9 habitants dans le monde sur 10 respirent un air pollué.

**L'Organisation mondiale
de la santé (OMS) parle de la pollution
atmosphérique comme d'un « défi
sanitaire majeur ». Quels risques
représente-t-elle pour notre santé ?**

En 2017, la pollution atmosphérique a provoqué dans le monde la mort prématurée de 7 millions d'individus, dont 48 000 en France. En effet, les particules fines en suspension dans l'air s'insinuent dans notre appareil respiratoire. Plus elles sont fines, plus elles sont capables de pénétrer profondément, jusqu'à atteindre les alvéoles pulmonaires, traverser la paroi des vaisseaux sanguins et par là se répandre dans tout l'organisme, et parfois jusque dans le cerveau. Ainsi, la pollution atmosphérique est un facteur aggravant des accidents cardiovasculaires, des AVC, des pathologies pulmonaires...

**Dans son dernier rapport, l'Anses
a conclu à l'inefficacité du port
de masque antipollution. Quels sont
ses arguments ?**

L'Anses a mené une vaste étude
de septembre 2015 à février 2018
sur les 215 références de masques dits

antipollution en vente en France. Le comité d'experts a mesuré l'efficacité de ces masques en laboratoire, définie par deux paramètres : la qualité de la filtration et l'étanchéité du dispositif sur le visage, ainsi que leur efficacité en conditions réelles. Premier constat : ces masques

ne sont conçus que pour filtrer les particules fines et non les gaz. La protection est donc relative. De plus, l'étude a révélé que si l'efficacité de certains masques semble élevée en laboratoire, celle-ci est cinq fois inférieure lorsqu'on la mesure sur le terrain pour un utilisateur précis ! En effet, la plupart des masques sont conçus pour des hommes adultes, en bonne santé et pour une activité physique peu intense. Ils ne conviennent donc pas à tous les visages, aux individus souffrant de troubles respiratoires ni aux personnes réalisant une activité physique importante... comme le vélo ! De plus, en conférant un faux sentiment de protection, ces masques entraînent des comportements à risques, dont celui d'une surexposition aux différentes sources de polluants.

De son côté, l'OMS a mené
une étude similaire à celle de l'Anses dans plusieurs pays. Les résultats, qui devraient être publiés ce mois-ci (septembre), sont similaires : aucun masque antipollution n'offre de protection efficace, notamment contre les particules ultrafines, les plus dangereuses.

**De quelles autres solutions dispose
le citoyen pour se protéger
de la pollution atmosphérique ?**

En termes de protection individuelle, il existe peu de solutions autres que limiter au maximum son exposition à un air pollué. Les actions ne peuvent être que collectives. Il faut repenser notre façon de consommer, de nous déplacer, de produire de l'énergie. C'est avec cette volonté que l'OMS organisera à Genève une importante conférence internationale sur la pollution atmosphérique du 30 octobre au 1^{er} novembre 2018. ■

Rapport de l'Anses : http://bit.ly/PLS491_Anses

PALÉONTOLOGIE HUMAINE

DES HOMINIENS EN CHINE, IL Y A 2,1 MILLIONS D'ANNÉES ?

L'une des pentes du plateau de Loess, en Chine, contenait des pierres taillées. Leurs âges poussent à faire reculer dans le temps la date de la première sortie d'Afrique. Mais de qui ?

Les membres du genre *Homo* sont sortis trois fois d'Afrique. La première sortie, censée être celle d'*Homo erectus*, était jusqu'ici datée à 1,8 million d'années à cause de l'âge des fossiles et des outils lithiques de type *erectus* du site de Dmanisi, en Géorgie. Or voilà que l'équipe de Zhaoyu Zhu, de l'Académie chinoise des sciences, a découvert en Chine des outils de pierre bien plus anciens que les vestiges de Dmanisi.

Entre 2014 et 2017, les paléontologues ont recherché des traces d'occupation sur la pente d'une colline située dans le plateau de Loess, à Shangchen. Là, entre les épaisses couches de ce fin sédiment éolien qu'est le loess, ils ont découvert 11 strates anciennes de sol ayant été occupées par des tailleurs de pierre. Épaisse de 39 mètres, cette séquence couvre une période débutant il y a 2,12 millions d'années et se terminant il y a 1,26 million d'années. Les dizaines de *choppers* (galets taillés), éclats, grattoirs et autres perçoirs découverts ont été obtenus soit par percussion sur enclume (on frappe un galet sur une enclume pour détacher des éclats), soit par percussion bipolaire sur enclume (on frappe avec un percuteur un galet posé sur une enclume). Ces 82 outils portent tous des cônes de percussion et des traces de retouches, qui les distinguent clairement d'éventuels géofacts, c'est-à-dire de pierres façonnées par des processus géologiques. Quant aux divers blocs de quartzite utilisés pour produire les outils, ils semblent provenir des monts Qinling, distants de 5 kilomètres. Par ailleurs, les 11 paléosols dont proviennent les artefacts correspondent à des périodes d'incursion du climat tropical humide au-delà des monts Qinling, climat auquel étaient adaptés nos ancêtres.

Dès lors, lesquels de ces ancêtres ont séjourné à Shangchen ? Si l'on pense à *Homo*, il importe de se rappeler que le plus ancien fossile réputé humain – la mandibule LD 350-1 trouvée à Ledi-Geraru, en Éthiopie – date de 2,8 millions d'années. *Homo* n'a donc pu se répandre en Eurasie qu'après.

Toutefois, depuis la découverte à Lomekwi, au Kenya, de pierres taillées d'époque australopithèque (3,3 millions d'années), la sortie d'Afrique d'hominiens préhumains devient



L'un des outils taillés à Shangchen, encore pris dans un paléosol formé par l'érosion du plateau de Loess il y a plus de 2 millions d'années. Il s'agit d'un *chopper*, c'est-à-dire d'un galet affûté.

11 PALÉOSOLS

C'EST LE NOMBRE DE STRATES CONSTITUÉES AU COURS DE PÉRIODES CHAUDES PAR L'ÉROSION DES TERRAINS DU PLATEAU DE LOESS. C'EST DANS CES COUCHES QU'ONT ÉTÉ DÉCOUVERTES DES PIERRES TAILLÉES D'ÂGES VARIANT DE 1,26 À 2,12 MILLIONS D'ANNÉES.

aussi envisageable. Or il existe des indices allant dans ce sens. Il en est ainsi de la découverte, dans la grotte de Longgupo, dans la municipalité de Chongqing (dans le Sichuan, sur le Yang-Tsé), de dents d'un hominidé mal identifié associées à de nombreux outils taillés. Leur datation vers 2,5 millions d'années a longtemps suscité la controverse. En 2017, une équipe franco-chinoise dont fait partie Éric Boëda, de l'université de Nanterre, a soigneusement réétudié et redaté le site et confirmé cette date. De son côté, sur le site de Masol, dans le nord de l'Inde, Anne Dambricourt-Malassé, du CNRS, a découvert avec son collègue indien Mukesh Singh des os portant des traces de découpe, dont la datation vers 2,6 millions d'années a aussi été controversée parce qu'indirecte. La situation a changé depuis : les chercheurs ont aussi mis au jour un *chopper* incrusté dans une strate directement datée à plus de 2,6 millions d'années. Dès lors, les constatations de Masol, de Longgupo et de Shangchen peuvent fort bien s'expliquer par la sortie d'Afrique, relativement tôt, d'hominiens préhumains tailleurs de pierre.

Alors, les tailleurs de Shangchen étaient-ils humains ou préhumains ? Pour le moment, les chercheurs en savent trop peu pour trancher. ■

FRANÇOIS SAVATIER

Zhaoyu Zhu et al., *Nature*, vol. 559, pp. 608-612, 2018

LES PLUS ANCIENNES TRACES DE L'ODYSSÉE

Des archéologues grecs et allemands ont exhumé une tablette d'argile en Grèce, près de l'ancienne cité d'Olympie, dans le Péloponnèse, où sont inscrits treize vers du chant 14 de l'*Odyssée* d'Homère. Les chercheurs estiment que cette inscription date du III^e siècle de notre ère, donc de l'époque romaine, ce qui ferait d'elle la plus ancienne évocation par écrit du long retour d'Ulysse vers son île d'Ithaque. Le poème, qui fait suite à l'*Iliade*, aurait été composé au VIII^e siècle avant notre ère, puis transmis oralement de génération en génération.

12 NOUVELLES LUNES POUR JUPITER

La planète géante compte désormais 79 lunes. Les dernières découvertes sont petites (entre 1 et 3 kilomètres de diamètre) et se sont formées après la naissance de Jupiter. Si deux d'entre elles sont sur une orbite proche de la planète, neuf ont des orbites très larges, allant jusqu'à 20 millions de kilomètres de Jupiter. La dernière se démarque par une orbite très inclinée par rapport à celle de ses voisines : il est probable qu'elle percute un jour les autres lunes à proximité, ce qui les réduira en poussière.

BIENVENUE DANS LE MEGHALAYEN

L'Holocène, l'ère géologique en cours, a débuté il y a 10 000 ans. En 2012, il avait été proposé de la diviser en trois étages : le Greenlandien, le Northgrippien et le Meghalayen. La Commission internationale de stratigraphie vient de ratifier cette subdivision. L'étage actuel est le Meghalayen ; il a débuté vers 2200 avant notre ère, une date marquée par un événement climatique important : l'un des plus sévères épisodes de sécheresse de tout l'Holocène.

LA DANSE DES GOUTTES

Dans certains dispositifs de microfluidique, qui manipulent de très petites quantités de fluides, il est intéressant de pouvoir déplacer des gouttelettes dans toutes les directions de l'espace. De nombreuses approches sont à l'étude. Dans l'une d'elles, Yang Xiao, de l'université de Wollongong, en Australie, et ses collègues utilisent de la lumière pour contrôler le mouvement de microgouttes de liquides organiques plongées dans de l'eau : elles se déplacent dans l'axe du faisceau lumineux, comme attirées par la source qui les éclaire.

Pour déplacer une goutte de quelques microlitres, les scientifiques s'appuient sur le phénomène de tension de surface, très important à cette échelle. Si la tension de surface change localement, le liquide se déplace, attiré par la région où la tension est la plus grande. C'est l'effet Marangoni. Il est alors possible de créer un mouvement convectif dans une goutte, ce qui conduit à son déplacement global.

Yang Xiao et ses collègues ont conçu un système chimique photosensible qui contrôle la tension de surface. La gouttelette contient deux composés chargés (un pigment cationique, de la mérocyanine, et un surfactant anionique). Lorsque ce système est soumis à une illumination, les deux molécules échangent un ion H⁺.



Il est possible de déplacer une gouttelette dans l'eau dans toutes les directions avec une source de lumière.

On obtient alors un système à deux composés neutres dont les propriétés de surfactant sont moindres, c'est-à-dire que ce système diminue moins la tension de surface que le système initial. Lorsque l'illumination cesse, le couple initial est régénéré. Ainsi, en illuminant un seul côté d'une microgoutte de solvant contenant ces composés, les chercheurs augmentent localement la tension superficielle. Grâce à l'effet Marangoni, le mouvement convectif recherché apparaît au sein de la goutte et fait avancer cette dernière vers la source lumineuse. La vitesse atteint 1 centimètre par seconde. ■

MARTIN TIANO

Yang Xiao et al., *Advanced Materials*, en ligne le 8 juillet 2018

PSYCHOLOGIE

TRAITER LA PEUR DU VIDE

La peur du vide est la phobie la plus commune et on peut parfois la traiter. Daniel Freeman, de l'université d'Oxford, au Royaume-Uni, et son équipe viennent de publier les résultats d'un essai clinique visant à traiter les patients atteints de vertige avec comme seul outil un casque de réalité virtuelle.

Lorsque les participants mettaient le casque, ils se retrouvaient plongés dans l'environnement virtuel du logiciel développé par l'équipe pour traiter la peur du vide. Ils évoluaient dans un bâtiment de dix étages. Au fil de leur promenade, des exercices divers et progressifs s'offraient à eux : s'approcher d'une barrière de sécurité, marcher sur une plateforme surplombant le vide, etc.

Deux semaines après le traitement, les résultats étaient très satisfaisants. Tous les



La réalité virtuelle offre des possibilités de thérapies innovantes, notamment contre la peur du vide.

participants du groupe ayant suivi la thérapie ont constaté une diminution de leur phobie. Ainsi, 34 des 49 personnes ayant testé le programme de réalité virtuelle n'étaient plus considérées, sur le plan médical, comme souffrant de vertige. ■

DONOVAN THIEBAUD

D. Freeman et al., *The Lancet Psychiatry*, en ligne le 11 juillet 2018

EN IMAGE

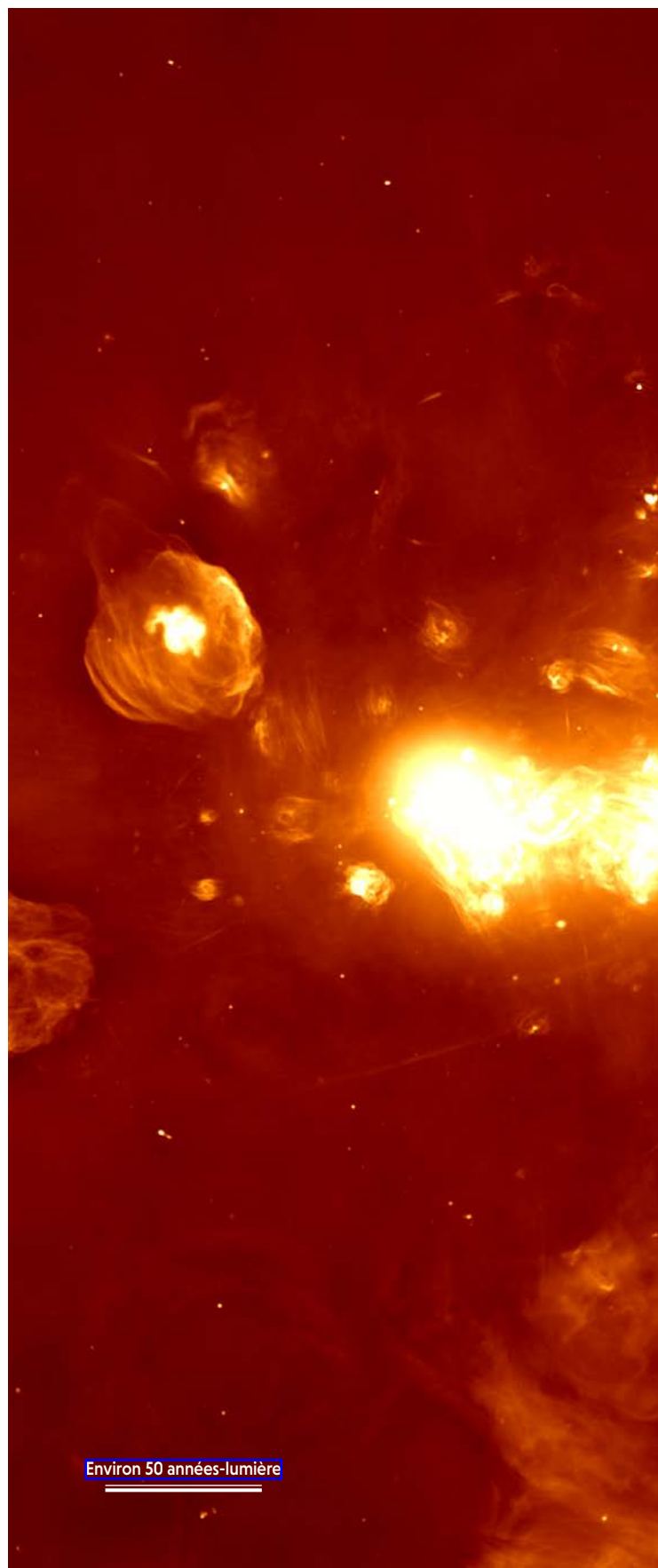
LE CENTRE DE LA VOIE LACTÉE SOUS L'ŒIL DE MEERKAT

À l'occasion de l'inauguration du radiotélescope *MeerKAT*, en Afrique du Sud, les membres de l'équipe en charge du projet ont dévoilé l'une de leurs premières images. Ce panorama représente la région centrale de la Voie lactée avec une précision remarquable. On y voit une source radio très brillante nommée Sagittarius A* (car elle se trouve dans la direction de la constellation du Sagittaire). Associé au trou noir supermassif situé au centre de la Galaxie, cet objet est difficile à observer dans les longueurs d'onde du spectre visible en raison des épais nuages de poussières et de gaz qui entourent le trou noir de 4 millions de masses solaires. En revanche, les ondes radio qu'émet Sagittarius A* sont peu absorbées, ce qui permet de les observer avec des radiotélescopes de grande envergure comme *MeerKAT*.

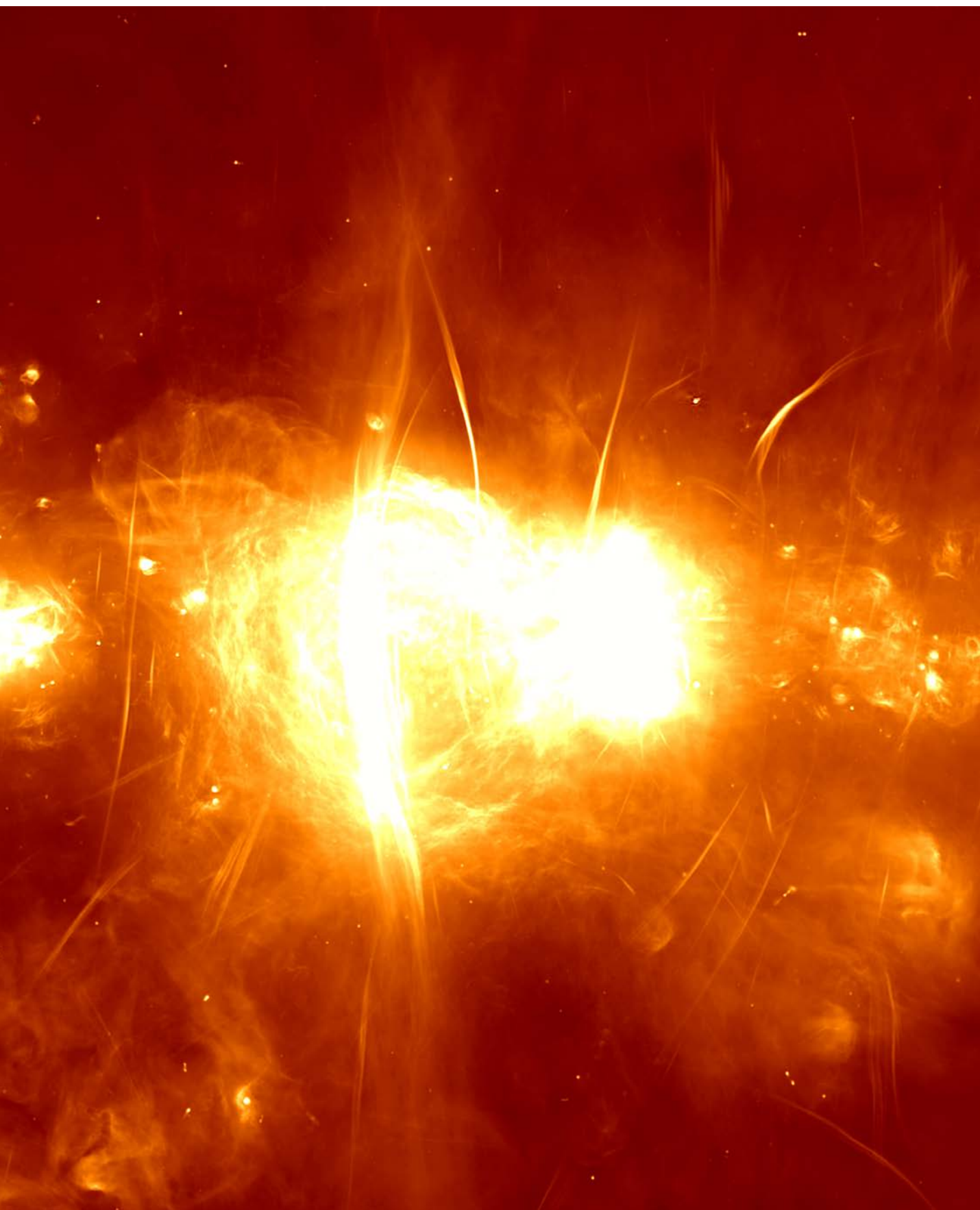
Pour obtenir une image d'une grande précision, *MeerKAT* comprend 64 antennes radio de 13,5 mètres d'envergure dont les signaux sont rassemblés en un seul grâce à la technique de l'interférométrie. Sur cette image du centre galactique, on distingue nettement des structures en filaments probablement liées à des champs magnétiques. Découverts dans les années 1980, ces filaments restent mal compris. Des observations d'une telle qualité permettront peut-être d'en percer le secret. Sur cette image, on voit aussi des bulles qui sont les nuages de matière expulsée par des supernovæ.

Avec *MeerKAT*, les astrophysiciens étudieront en particulier des événements astronomiques transitoires tels que les sursauts radio rapides et la formation des étoiles, phénomène caché, à l'instar du trou noir du centre galactique, dans de vastes nuages de gaz. Et en 2020, devraient s'ajouter à *MeerKAT* 130 antennes en Afrique du Sud ainsi que 130 000 antennes en Australie, pour former *SKA* (*Square Kilometer Array*), qui sera le plus grand radiotélescope du monde. Un projet que plusieurs laboratoires français ont officiellement rejoint en juillet 2018. ■

L. S.

<http://www.ska.ac.za>

Environ 50 années-lumière



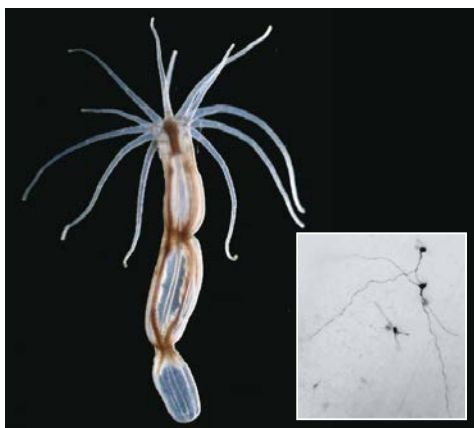
© Observatoire de l'Étoile de l'Afrique du Sud

BIOLOGIE

LA COMPLEXITÉ DE L'ANÉMONE

Un cylindre et des tentacules, voilà peu ou prou la morphologie de l'anémone de mer. Pourtant, le génome de cet invertébré marin, séquencé pour la première fois en 2007, est d'une complexité proche de celui de l'homme. Il y a là un paradoxe que Heather Marlow, de l'institut Pasteur, et ses collègues ont levé: l'espèce *Nematostella vectensis* présente en effet une diversité cellulaire bien plus riche que ne le laisse penser sa morphologie.

Pour mettre cette diversité en évidence, l'équipe a utilisé une technique récente, qui connaît une véritable explosion ces dernières années: le séquençage de transcriptome (les ARN issus de la transcription du génome) à l'échelle de la cellule individuelle. Cela consiste à dissocier l'organisme en cellules individuelles, par différents moyens, par exemple à l'aide d'enzymes ou d'une action mécanique, jusqu'à obtenir une suspension de cellules. On isole ensuite chaque cellule, puis on en séquence l'ARN. «On peut ainsi obtenir le profil transcriptionnel de tous les types cellulaires d'un organisme; c'est un progrès énorme. Et c'est la première fois que cette technique est utilisée sur un animal non bilatériel (organisme qui ne présente pas de symétrie gauche-droite)», explique Lucas Leclère, chercheur au



L'anémone de mer *Nematostella vectensis* présente une diversité cellulaire exceptionnelle (en médaillon, des neurones vus au microscope).

Laboratoire biologie du développement, à Villefranche-sur-Mer.

L'étude du transcriptome permet de savoir exactement quels gènes sont exprimés dans chaque cellule et donc de distinguer différentes sous-catégories de cellules. Les chercheurs ont ainsi déterminé que l'anémone en question est constituée d'une centaine de types différents de cellules. «On ne pensait pas qu'il y en avait autant», commente Heather Marlow. Et de façon surprenante, les chercheurs ont identifié plus d'une trentaine de types de neurones! ■

ALINE GERSTNER

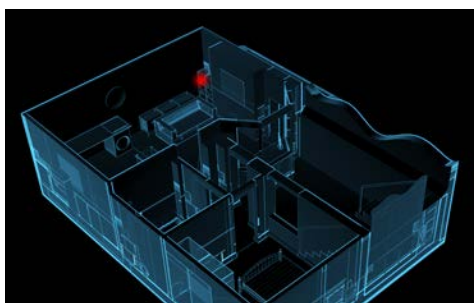
A. Sebé-Pedrós et al., *Cell*, vol. 173(6), pp. 1520-1534, 2018

TECHNOLOGIE

LOCALISER AVEC DES MICROONDES

Détecter et localiser un objet qui émet un signal dans une pièce n'est pas simple. Il faut prendre en compte les réflexions du signal sur les murs et les obstacles. Mais si l'objet n'émet pas de signal, la tâche est encore plus ardue. Philipp del Hougne, de l'institut Langevin, et ses collègues ont montré qu'il est en fait possible de mettre à profit la réverbération d'une impulsion de microondes émises dans la pièce et diffusées en partie par l'objet pour déterminer une empreinte de sa position.

L'idée est d'établir un catalogue de signaux enregistrés pour diverses positions de l'objet. Ainsi, en captant un signal, il suffit de comparer cette mesure avec chaque position du catalogue pour déterminer où se trouve l'objet. Par cette technique, les chercheurs parviennent même à démêler les empreintes de plusieurs objets et



En analysant les échos d'une émission de microondes, on localiserait une personne ou un objet dans une maison.

à les localiser en même temps. Cette découverte peut avoir des applications dans le domaine des maisons intelligentes et aussi dans le domaine médical, par exemple, pour surveiller des personnes âgées qui vivent seules chez elles. Ce dispositif serait un peu moins intrusif qu'une caméra vidéo. ■

D. T.

P. del Hougne et al., à paraître dans *Physical Review Letters*, 2018

EN BREF

UN LAC D'EAU LIQUIDE SUR MARS

En analysant les données recueillies durant trois ans par le radar Marsis de la sonde orbitale Mars Express, Roberto Orosei, de l'institut d'astrophysique à Bologne, en Italie, et ses collègues auraient détecté un lac d'eau saumâtre (ou de sédiments saturés en eau) pérenne sous la calotte glaciaire du pôle sud de Mars. Profond d'au moins quelques mètres, il aurait une largeur de 20 kilomètres environ. Ce résultat reste à confirmer par d'autres observations, auquel cas ce serait le premier réservoir d'eau liquide identifié sur la Planète rouge.

CHASSE À LA BALEINE CHEZ LES ROMAINS

Au moyen d'une analyse d'ADN, une équipe que dirige Ana Rodrigues, du CNRS à Montpellier, a identifié des fragments d'os de baleines sur des sites d'époque romaine liés à la pêche près du détroit de Gibraltar. Y chassait-on la baleine? C'est probable, mais l'absence d'os entiers sur le site des fouilles empêche de l'affirmer. Ces restes pourraient aussi provenir de baleines échouées sur les côtes, dont les carcasses auraient ensuite été dépecées.

DES PREMIERS SOUVENIRS FICTIFS

D'après plusieurs études, le premier souvenir que l'on a ne se forme pas avant l'âge de trois ans. Martin Conway, de la City University of Londres, et ses collègues ont interrogé 6 641 personnes sur leur premier souvenir non lié à une histoire de famille ou à une photo, en leur demandant de le dater. Près de 40 % des sujets interrogés affirment avoir un souvenir de quand ils avaient moins de deux ans. Mais l'analyse des éléments des souvenirs suggère qu'ils proviennent de divers fragments mémorisés par la personne, qui finit par les associer et fabriquer un faux souvenir.

LE MALI, BERCEAU DE LA DOMESTICATION DU RIZ AFRICAIN

Grâce à une vaste étude génomique, des chercheurs ont montré que la culture du riz africain est apparue au Mali, il y a 3 000 ans, après une longue période de sécheresse.

Céréale nourrissant près de la moitié de la population mondiale, le riz asiatique *Oryza sativa* a été largement décrit par les scientifiques. En revanche, le riz africain *Oryza glaberrima*, espèce qui a divergé de son homologue asiatique il y a un million d'années, restait jusqu'à présent assez méconnu. Yves Vigouroux, de l'IRD (Institut de recherche pour le développement), et ses collègues ont analysé l'ADN de plus de 200 plants de riz africain cultivé, *Oryza glaberrima*, et de riz sauvage, *Oryza barthii*, provenant du Sahel. Ils ont ainsi retracé l'histoire de la domestication du riz africain.

En 2014, une équipe américaine a déterminé que la domestication du riz en Afrique remonte à 3000 ans. Mais le foyer de cette domestication restait jusqu'à présent assez flou. Pour le préciser, Yves Vigouroux et son équipe ont analysé l'ADN de 163 plants de riz domestiqué, en s'intéressant particulièrement à des SNP (polymorphismes d'un seul nucléotide), des paires de bases du génome qui varient parmi les individus d'une même espèce. Puis ils ont comparé ces séquences à celles de 83 plants sauvages d'*Oryza barthii*, l'espèce dont est issu le riz domestiqué *Oryza glaberrima*. Cela a permis de délimiter la zone géographique où le riz sauvage et le riz cultivé sont les plus proches génétiquement, c'est-à-dire le berceau de la domestication du riz : il se trouve dans le delta intérieur du fleuve Niger, au Mali.

Ces analyses ont également permis d'estimer les variations, au cours du temps, de la taille des différentes populations de riz, par une méthode dite de coalescence génétique. Il s'agit d'abord de déterminer, pour deux individus pris au hasard dans une population d'époque donnée, l'âge de leur dernier ancêtre commun, calculé d'après leur différence génétique. Puis on utilise le fait que, statistiquement, plus cet ancêtre commun est ancien, plus la population à laquelle appartenaient les deux individus était grande.

Les chercheurs ont ainsi montré qu'il y a entre 10000 et 3000 ans, la diversité du riz africain a nettement chuté. Selon eux, la cause serait climatique. «Autrefois, le Sahara était une région arborée, peuplée de girafes, de gazelles...



Le riz africain *Oryza glaberrima* représente un enjeu important en Afrique, continent qui importe de grandes quantités de riz asiatique (*Oryza sativa*).

5,5
MILLIARDS
DE DOLLARS
C'EST CE QUE
REPRÉSENTENT
LES IMPORTATIONS
DE RIZ ASIATIQUE
DANS LES 43 PAYS
AFRICAINS
PRODUCTEURS
DE RIZ.
SELON LE PAYS
CONCERNÉ,
CES IMPORTATIONS
COUVRENT ENTRE
10 ET 90 %
DES BESOINS.

Source : AfricaRice, rapport annuel, 2016

Puis, à partir d'il y a 9000 ou 10000 ans, la région est devenue de plus en plus aride, ce qui a entraîné un bouleversement de la biodiversité et une réduction importante des populations de riz», explique Yves Vigouroux. Le chercheur et son équipe supposent que «cette raréfaction du riz sauvage a conduit les populations de chasseurs-cueilleurs à conserver les graines d'une année sur l'autre, et les a progressivement transformés en agriculteurs.»

Mais le climat n'a pas été le seul paramètre ayant joué sur la diversité du riz en Afrique. En effet, cette diversité a chuté une seconde fois au cours de ces cinq derniers siècles. Cette fois, c'est le riz asiatique qui en serait la cause : importé massivement par les Portugais lors de la colonisation de l'Afrique au XVI^e siècle, sa culture, plus productive, aurait peu à peu remplacé celle du riz autochtone.

Pourtant, plus résistant aux fortes chaleurs, aux maladies et nécessitant moins d'eau, le riz africain a de nombreux avantages. Pour Yves Vigouroux, «l'étude de ce riz pourrait constituer un enjeu pour l'agriculture de demain, surtout dans un contexte où le réchauffement climatique affecte déjà les rendements agricoles.» ■

C. M.

P. Cubry et al., *Current Biology*, vol. 28(14), pp. 2274-2282, 2018

GÉOSCIENCES

LE RÔLE DES GAZ À EFFET DE SERRE À LA FIN DE L'ÉOCÈNE

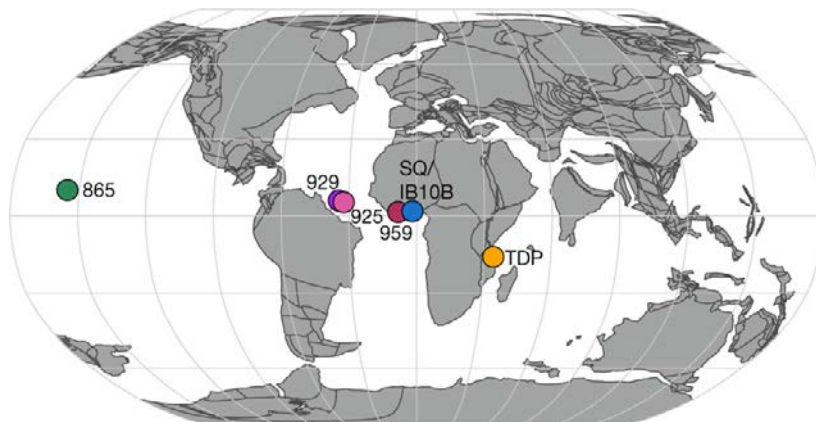
La chute de température à la fin de cette période géologique, il y a 34 millions d'années, serait due à la baisse de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre.

Le réchauffement climatique en cours s'explique surtout par les émissions anthropiques de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone, méthane, etc.) dans l'atmosphère. Pour comprendre comment le climat évoluera, il est intéressant d'étudier la dynamique atmosphérique du passé, notamment durant l'Éocène. En effet, cette période géologique, il y a entre 56 et 34 millions d'années, a été l'une des plus chaudes. Sa fin est marquée par une chute rapide des températures. Margot Cramwinckel, de l'université d'Utrecht, aux Pays-Bas, et des collègues de plusieurs pays ont analysé des sédiments de l'océan Atlantique afin de déterminer la cause de cette baisse de température.

Les géologues proposaient deux scénarios pour expliquer cette évolution. Le premier s'appuie sur le fait qu'à la fin de l'Éocène, l'Australie et l'Antarctique, qui ne formaient qu'un seul continent, se sont séparés. Cette ouverture aurait modifié les courants marins profonds, ce qui aurait provoqué une chute de la température des eaux océaniques de l'hémisphère Sud. La seconde piste est celle d'une baisse de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre. La température des océans aurait diminué, mais selon une dynamique et une répartition différentes du premier scénario.

Pour départager ces hypothèses, Margot Cramwinckel et ses collègues ont mesuré, dans des sédiments, les variations de concentration en lipides produits par des bactéries du genre *Thaumarchaeota*. Les traces laissées par ces organismes (des archées), qui synthétisent des quantités de lipides différentes selon la température de leur environnement, permettent de déterminer les variations de température dans les régions tropicales à la fin de l'Éocène.

En comparant ces températures à celles issues de carottes prélevées dans d'autres océans, les chercheurs ont reconstruit l'évolution des différences de température entre les eaux océaniques polaires et équatoriales (on parle de gradient thermique méridional). Résultat : ce gradient s'accroît au cours de l'Éocène alors que la température océanique des deux régions diminue. D'après le modèle développé par Margot Cramwinckel et ses



Cette carte montre comment l'Australie et l'Antarctique ont commencé à se séparer à la fin de l'Éocène. Les sédiments étudiés (point bleu) ont été comparés à d'autres (les autres points) pour déterminer les températures océaniques durant l'Éocène.

8 °C DE PLUS

QUE LA TEMPÉRATURE MOYENNE ACTUELLE, C'EST CE QUI PRÉVALAIT AU COURS DE LA TRANSITION ENTRE LE PALÉOCÈNE ET L'ÉOCÈNE. CAUSE PROBABLE, SELON LES DONNÉES GÉOPHYSIQUES : UNE IMPORTANTE HAUSSE DE LA CONCENTRATION ATMOSPHÉRIQUE EN GAZ À EFFET DE SERRE IL Y A 56 MILLIONS D'ANNÉES.

collègues, ces observations signifient que le changement global de température a eu un effet beaucoup plus important sur les régions polaires que sur les régions tropicales à la fin de l'Éocène. Ce phénomène, connu sous le nom de facteur d'amplification polaire, est caractéristique de l'influence des gaz à effet de serre. Les chercheurs en concluent que c'est la baisse de concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère qui a provoqué le refroidissement de la fin de l'Éocène.

L'équipe de Margot Cramwinckel a aussi noté que les températures des régions tropicales durant l'Éocène variaient beaucoup. Elle suggère que les régions tropicales étaient très sensibles aux changements de composition atmosphérique et de concentration en gaz à effet de serre, avec un effet direct sur les températures. Transposé à l'évolution actuelle du climat, ce résultat souligne l'importance critique de maîtriser les émissions de gaz à effet de serre.

Par ailleurs, le modèle proposé par ces chercheurs est le premier capable de reproduire les variations de températures océaniques et les gradients de température sur des périodes de temps aussi longues. Il fournit aux climatologues des outils robustes pour estimer les évolutions futures de notre climat. ■

LAMBERT BARAUT-GUINET

M. J. Cramwinckel et al., *Nature*, vol. 559, pp. 382-386, 2018

ARCHÉOLOGIE

DU PAIN AVANT L'AGRICULTURE

Du pain calciné, retrouvé en Jordanie dans les vestiges de foyers vieux de plus de 14 000 ans, s'est révélé préparé à partir de céréales sauvages. Il serait ainsi antérieur d'au moins 4 000 ans à l'émergence de l'agriculture.

Ces deux foyers, des sortes de fours circulaires, étaient enfouis sous le site archéologique de Shubayqa 1, où se trouvait auparavant un village de Natoufiens, un peuple de chasseurs-cueilleurs de la fin du Paléolithique. Au vu de la complexité, du temps de préparation et du coût en énergie de la fabrication de cet aliment, Amaia Arranz-Otaegui, de l'université de Copenhague, et ses collègues suggèrent que ces peuples consommaient du pain en période de fête pour impressionner les convives. ■

F. S.

A. Arranz-Otaegui et al., PNAS, vol. 115 (31), pp. 7925-7930, 2018

PHYSIQUE

L'ÉLASTICITÉ DU TRICOT COMPRISE

Le tricot, contrairement à une toile tissée, est constitué d'un unique fil qui dessine des méandres pour former les mailles. C'est cette topologie complexe qui assure l'élasticité du tricot, le fil glissant de maille en maille lorsque le matériau est étiré. Les modèles décrivant ce comportement n'étaient jusqu'à présent pas très satisfaisants. Samuel Poincloux, de l'École normale supérieure, à Paris, et ses collègues en proposent un nouveau.

Ces physiciens ont d'abord suivi avec une caméra la déformation individuelle de chaque maille dans un tricot étiré. Ils ont alors élaboré un modèle, dont l'élément fondamental est une cellule à quatre côtés qui peut se déformer mais qui doit respecter certaines contraintes liées à la topologie du matériau. Ce modèle restitue parfaitement les observations lors de l'étirement du tricot. Une avancée qui intéressera l'industrie, notamment dans le domaine biomédical, les propriétés d'élasticité et de drapé du tricot ayant de nombreuses applications potentielles. ■

SEAN BAILLY

S. Poincloux et al., Physical Review X, vol. 8, article 021075, 2018

PALÉOANTHROPOLOGIE

UN DEMI-MILLION D'ANNÉES DE SAPIENS



L'apparition dans le registre fossile africain de ces pointes bifaciales, pointes de flèches, perles en coquillage, morceaux d'ocre ou d'œufs d'autruche engravés signale l'émergence d'*Homo sapiens*.

Une brochette de paléanthropologues insignes, comprenant les préhistoriens Francesco d'Errico et Lounes Chikhi du CNRS, vient de publier un article rejetant l'idée que notre espèce, *Homo sapiens*, est le produit de l'évolution depuis 200 000 ans d'une seule population dans une unique région africaine.

Au lieu de cela, ces chercheurs proposent que la lignée *sapiens* a commencé à émerger en Afrique, il y a au moins 500 000 ans, ce qui est évidemment une conséquence de la découverte récente de plusieurs fossiles *sapiens* de quelque 315 000 ans d'âge... Ils vont même plus loin, en partant de la constatation que les plus anciens fossiles *sapiens* connus traduisent une assez grande diversité morphologique et sont disséminés à travers toute l'Afrique. Selon eux, si l'on tient compte des données archéologiques, génétiques, paléoclimatiques et paléoécologiques, cette situation correspond plutôt à l'idée que notre espèce s'est diversifiée au sein d'un réseau de populations réparties à travers toute l'Afrique. Les divers bassins de ces populations étaient séparés par des barrières naturelles, tels le Sahara ou la forêt, mais reliés par des flux géniques sporadiques. La dissémination de la population ancestrale *sapiens* a favorisé son hybridation avec des formes humaines divergeant d'*H. sapiens*, hybridation qui a d'ailleurs continué à se produire lorsque *H. sapiens* est sorti d'Afrique.

Ainsi, l'archéologie et les autres paléosciences devront désormais être convoquées ensemble chaque fois que l'on cherchera à préciser quel réseau natif *sapiens* a pu exister à une certaine époque. Un point que Lounes Chikhi commente ainsi : « Les données convergentes issues de ces différents domaines soulignent l'importance de considérer la structure des populations dans les modèles d'évolution humaine. Cela devrait donc nous amener à remettre en question les modèles actuels de changements de la taille de la population ancienne, et peut-être réinterpréter certains des anciens goulots d'étranglement, comme des changements dans la connectivité. » Décidément, tout est affaire de réseau aujourd'hui ! ■

F. S.

E. Scerri et al., Trends in Ecology and Evolution, en ligne le 11 juillet 2018

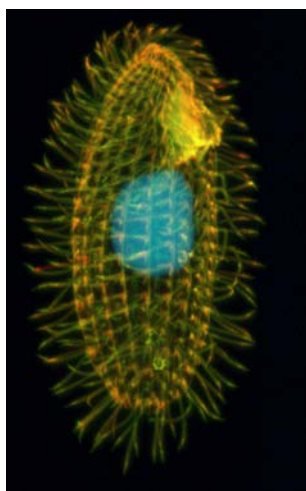
ÉVOLUTION

LE SEXE ENGENDRE LES SEXES

Chez la plupart des espèces, il n'existe que deux sexes. Mais certaines en comptent plus d'une centaine. Quelles contraintes expliquent l'apparition de nouveaux types sexuels ?

Dans la plupart des forêts du monde, sur de vieilles souches, vit le champion du sexe toutes catégories : *Schizophyllum commune*, un petit champignon blanc. En effet, chez cette espèce il n'existe pas deux, mais... 23 000 sexes différents ! Cette profusion a un avantage : elle multiplie le nombre de partenaires possibles. Ce champignon peut se reproduire avec 22 999 types sexuels sur les 23 000 disponibles, quand le système mâle-femelle n'offre, pour la reproduction, qu'une seule catégorie possible de partenaires. Malgré tout, les espèces à deux sexes restent largement majoritaires. George Constable, mathématicien à l'université de Bath, au Royaume-Uni, et Hannah Kokko, biologiste de l'université de Zurich, en Suisse, ont développé un modèle mathématique visant à mieux comprendre les contraintes qui limitent, au sein de la biodiversité, la profusion des sexes.

Chez *Schizophyllum commune* comme chez toutes les espèces dites isogames – à l'instar des algues, champignons, microorganismes –, les différences entre sexes ne s'expriment que d'un point de vue génétique. La mutation d'un seul gène peut alors conduire à l'apparition d'un nouveau sexe !



Le cilié *Tetrahymena thermophila*, qui ne se reproduit, par voie sexuelle, qu'une fois toutes les cent générations environ, compte sept types sexuels différents.



Le champignon *Schizophyllum commune* présente pas moins de 23 000 types sexuels. Un individu d'un type donné peut se reproduire avec un autre si celui-ci appartient à l'un des 22 999 autres types.

Le modèle de George Constable et de Hannah Kokko porte sur les espèces isogames et repose d'abord sur deux paramètres : le taux de mutation et la taille de la population. Si le taux de mutation conditionne la fréquence d'émergence de nouveaux types sexuels, la taille de la population influe, elle, sur leur disparition. En effet, plus une population est petite, plus grande est la probabilité que certains allèles (versions d'un gène) codant un type sexuel disparaissent au fil des générations.

Mais l'originalité du travail de George Constable et Hannah Kokko réside dans l'introduction d'un troisième paramètre : le taux de reproduction sexuée au sein de l'espèce. En effet, chez de nombreuses espèces isogames, la reproduction sexuée est facultative. Les levures *Saccharomyces cerevisiae*, par exemple, ne se reproduisent qu'une fois toutes les 5 000 générations, pratiquant davantage la division cellulaire (reproduction asexuée).

Les deux chercheurs ont alors montré que dans une population qui ne se reproduit que par reproduction sexuée – comme le champignon *S. commune* –, mais avec une faible fréquence de mutation, une centaine de types sexuels différents émergeront au cours des générations. À l'inverse, de toute évidence, si l'espèce ne se reproduit que par reproduction asexuée, un seul sexe se maintient au cours des générations. Entre les deux, plus le taux de reproduction sexuée est fort, plus le nombre de sexes pouvant apparaître sera élevé.

Ainsi, si la plupart des espèces isogames présentent deux types sexuels, c'est qu'elles sont nombreuses à pratiquer une reproduction sexuée très occasionnelle et une reproduction asexuée courante. Cette pratique s'explique assez bien : la reproduction asexuée a l'avantage d'être rapide et peu coûteuse en énergie, et elle permet de transmettre l'intégralité du patrimoine génétique du parent. Mais lorsque les conditions du milieu changent, la reproduction sexuée devient plus avantageuse, car les nouvelles combinaisons génétiques qu'elle introduit peuvent conduire à des organismes mieux adaptés au nouvel environnement. ■

C. M.

G. W. A. Constable et H. Kokko, *Nature Ecology & Evolution*, vol. 2, pp. 1168-1175, 2018

COSMÉTIQUES ÉGYPTIENS

La phosgénite, un carbonate de plomb, était un ingrédient classique des cosmétiques en Égypte antique. La phosgénite naturelle étant très rare, les historiens soupçonnaient les anciens Égyptiens de maîtriser déjà sa synthèse. Pour le prouver, Lucile Beck, de l'université Paris-Saclay, et ses collègues ont analysé des échantillons retrouvés dans des pots datant de 1500 ans avant notre ère et conservés au musée du Louvre, en adaptant une méthode de datation normalement utilisée sur des échantillons organiques (bois, os, etc.) : la datation au carbone 14. Résultat : la phosgénite égyptienne a bien été synthétisée, car le carbone qui la compose provient de sources organiques ou atmosphériques datant de la même époque que les pots. Les chercheurs proposent de dater ainsi les peintures, de toutes époques, contenant des pigments carbonatés. ■

M. T.

L. Beck et al., *Communications Chemistry*, vol. 1, article 34, 2018

MORTELLE MIGRATION

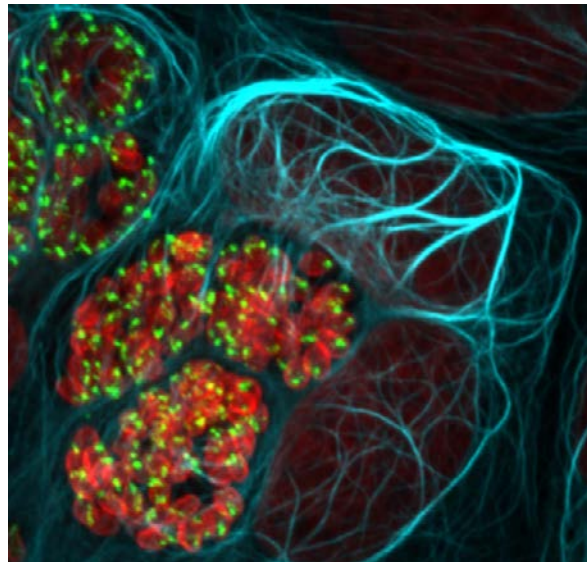
Chaque année, des oies, les bernaches nonnettes, passent l'hiver en Grande-Bretagne, aux Pays-Bas et en Allemagne puis migrent vers le nord pour se reproduire. Or, avec le réchauffement climatique, les printemps sont de plus en plus précoces en Arctique. Une équipe de l'université d'Amsterdam menée par Bart Nolet a ainsi constaté que ces oies sont capables d'accélérer leur migration en cours de route pour arriver plus tôt en Arctique.

Les oies seraient capables de juger au cours du voyage, grâce à des repères environnementaux, quand aura lieu le printemps en Arctique. Ce comportement semble *a priori* avantageux pour la survie des futurs poussins, mais il n'en est rien ! Migrer plus vite demandant plus d'efforts, les oies arrivent épuisées et ne peuvent pas pondre dès leur arrivée. Elles attendent finalement la même époque que d'habitude. Conséquence tragique : les poussins ratent le printemps et, la nourriture n'étant plus assez disponible, ils meurent de faim. ■

CLAIRE HEITZ

T. Lameris et al., *Current Biology*, vol. 28, pp. 1-7, 2018

LE TWIST DU PARASITE DE LA TOXOPLASMOSE



Dans une cellule humaine, dont on distingue les microtubules (en bleu), des vacuoles contiennent la progéniture d'un seul parasite *Toxoplasma*. Les contours des parasites sont marqués en rouge et une protéine produite par ces protozoaires apparaît en vert.

La toxoplasmose est une infection parasitaire provoquée par le protozoaire *Toxoplasma gondii*. Si elle est en général bénigne, elle peut être dangereuse pour les fœtus des femmes enceintes et les personnes immunodéprimées. Chez toutes ses victimes, humains compris, le parasite de la toxoplasmose doit pénétrer dans des cellules hôtes et y créer une niche protectrice, la vacuole parasitophore, pour se multiplier aux dépens de la cellule nourricière. Certains aspects du processus restaient à préciser. Afin de concevoir de nouvelles stratégies de lutte contre ce parasite, une équipe de l'Inserm, à Grenoble, menée par Isabelle Tardieux, a étudié, grâce à des techniques d'imagerie à haute vitesse et haute résolution, comment le protozoaire envahit les cellules de ses hôtes.

Pour pénétrer dans une cellule, le parasite injecte des protéines dans la membrane. Ces molécules forment une « porte » qui sert de point d'appui au parasite pour se propulser à l'intérieur et forcer le « bourgeonnement » de la membrane en formant la vacuole. Jusqu'à présent, on ignorait comment le parasite refermait la porte derrière lui tout en préservant l'intégrité de la membrane cellulaire. L'équipe grenobloise vient d'élucider l'énigme : le parasite effectue un mouvement de rotation sur lui-même. Cela provoque mécaniquement un rapprochement des deux régions de la membrane, ce qui favorise leur fusion et l'isolement de la vacuole. En fixant des billes micrométriques à l'extrémité postérieure du parasite, les chercheurs ont empêché sa rotation et donc la fermeture de la porte. Ce défaut d'étanchéité entraîne un gonflement anormal du bourgeon membranaire, qui comprime le parasite et finit par le tuer.

Les travaux de l'équipe d'Isabelle Tardieux permettront peut-être d'identifier des cibles intéressantes pour contrer la capacité invasive non seulement de *Toxoplasma gondii*, mais aussi de *Plasmodium*, le parasite responsable du paludisme, lequel utilise un complexe similaire comme point d'ancrage et porte d'entrée dans les globules rouges. ■

C. H.

G. Pavlou et al., *Cell Host & Microbe*, vol. 24, pp. 81-96, 2018

NEUROSCIENCES

LE MOUVEMENT VU PAR LE CRABE

Estimer à quelle distance se situe une source de nourriture, un prédateur ou un partenaire sexuel nécessite deux yeux. En effet, l'analyse des légères différences perçues par l'œil droit et par l'œil gauche permet une perception de l'espace en trois dimensions. Daniel Tomsic et son équipe, de l'université de Buenos Aires, en Argentine, se sont intéressés à la perception binoculaire d'un objet en mouvement chez le crabe *Neohelice granulata*.

Ce petit crabe d'Amérique du Sud a des yeux composés dont chaque facette, appelée ommatidie, constitue un œil simple, structure que l'on retrouve aussi chez les insectes. L'intégration des informations visuelles provenant de chaque ommatidie, notamment la perception du mouvement, se fait dans un tissu nerveux situé juste en dessous de l'œil, appelé lobe oculaire. Daniel Tomsic et ses collègues avaient déjà montré que les neurones du lobe, la partie postérieure du lobe oculaire, étaient spécialisés dans la perception du mouvement. Mais, pour la vision binoculaire, ces neurones intègrent-ils des signaux des deux yeux?



La perception du mouvement chez le crabe *Neohelice granulata* met bien en œuvre la vision binoculaire.

Pour le savoir, les chercheurs ont mesuré l'activité électrique des neurones lobulaires droits de 34 crabes placés devant deux écrans d'ordinateur où apparaissaient des barres noires (sur l'un ou l'autre écran, ou les deux). Les profils électriques obtenus ont permis d'établir que ces neurones perçoivent bien des informations en provenance des deux yeux, avec plus ou moins d'affinité selon l'œil considéré. ■

C. M.

F. Scarano et al., *J. of Neuroscience*, en ligne le 16 juillet 2018

EN BREF

LE FLAIR PERTURBÉ DES POISSONS

L'augmentation de la concentration de dioxyde de carbone dissous dans les océans, du fait des activités humaines, a une conséquence inattendue chez certaines espèces de poissons. L'équipe de Cosima Porteus, de l'université d'Exeter, au Royaume-Uni, a étudié les capacités olfactives des bars européens (*Dicentrarchus labrax*) en fonction de la concentration de dioxyde de carbone dissous dans l'eau. Bilan : en présence de taux de dioxyde de carbone élevé, les bars ont du mal à repérer leur nourriture, mais aussi les prédateurs. Les chercheurs ont mis en évidence des mécanismes physiologiques et moléculaires qui expliquent ces observations. Par exemple, les molécules odorantes se fixent moins bien sur les récepteurs olfactifs.

© Daniel A. Prina

**Commandez
votre reliure**

POUR LA
SCIENCE



BON DE COMMANDE

À retourner accompagné de votre règlement à :
Pour la Science – Service VPC
19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex
e-mail : pourlascience@abopress.fr



OUI, je commande :

- ☐ 1 reliure *Pour la Science* au prix unitaire de 18,90 €*
- ☐ 2 reliures *Pour la Science* au prix de 37,80 €*
- ☐ 3 reliures *Pour la Science* au prix de 56,70 €*

Une reliure peut contenir 12 numéros.

Les prix affichés incluent les frais de port.

Groupe Pour la Science – Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris
CEDEX 14 – Sarl au capital de 32.000 € – RCS Paris B 311797393 – Siret : 311797393000 23 – APE 5814 Z

Offre valable jusqu'au 31/12/2019 en France métropolitaine uniquement. Pour l'export, merci de contacter le service VPC. Les prix affichés incluent les frais de port et frais logistiques. Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société Pour la Science. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement.

1 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom :

Prénom :

Adresse :

Code postal

Ville :

Telephone

Mon e-mail :

.....@.....

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science

☐ OUI ☐ NON

2 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Carte bancaire

N°

Date d'expiration

Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB)

Signature obligatoire :

Pour la Science ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

MÉDAILLES FIELDS 2018: DES LAURÉATS SANS FRONTIÈRES

La diversité des nationalités des nouveaux lauréats de cette prestigieuse récompense illustre le cosmopolitisme des mathématiques. Petit regret, l'absence de femmes.

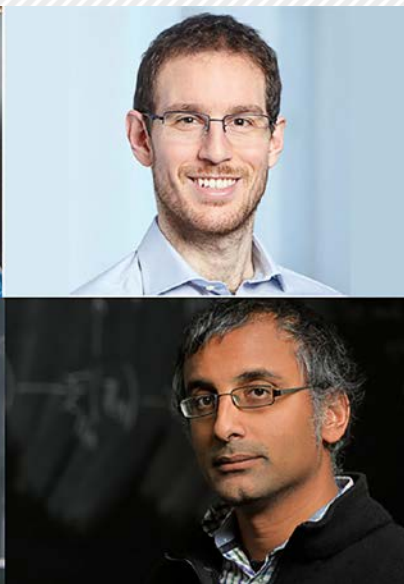
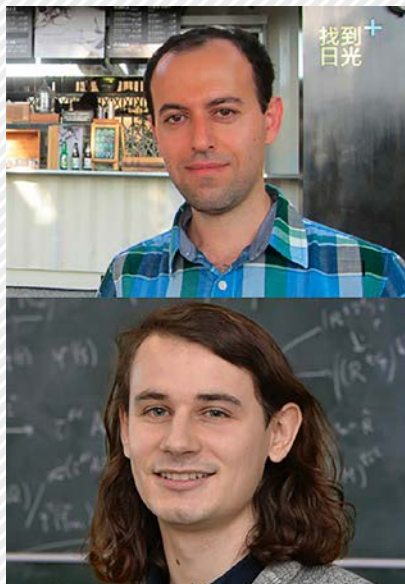
Tous les quatre ans, les mathématiciens se réunissent pour un congrès international où les chercheurs présentent un état de l'art de la discipline. La 28^e édition s'est tenue pour la première fois dans l'hémisphère Sud, à Rio de Janeiro, au Brésil. Lors de la cérémonie d'ouverture, les noms des quatre lauréats de la très convoitée médaille Fields ont été dévoilés: Caucher Birkar, Alessio Figalli, Peter Scholze et Akshay Venkatesh.

La médaille Fields est l'un des prix les plus prestigieux en mathématiques. Elle est attribuée à deux, trois ou quatre chercheurs de moins de 40 ans tous les quatre ans. Pour le mathématicien canadien John Charles Fields, à l'origine du prix, celui-ci est, d'une part, une reconnaissance des résultats obtenus par les lauréats, mais aussi un encouragement pour les chercheurs récompensés à poursuivre leurs travaux et une stimulation pour l'ensemble de la communauté. Qui sont donc les quatre chercheurs récompensés cette année?

Caucher Birkar est un mathématicien britannique d'origine kurde et né en Iran en 1978. Il est professeur à l'université de Cambridge et spécialiste de géométrie algébrique. Il a notamment contribué à un champ particulier, la géométrie dite birationnelle. Il a obtenu des résultats fondamentaux dans la classification de variétés algébriques (des objets géométriques définis par des équations polynomiales, comme $y^2 = x^3 + 3$).

Alessio Figalli est un mathématicien italien de 34 ans, chargé de recherche au CNRS et actuellement détaché à l'École polytechnique fédérale de Zurich. Il a effectué sa thèse sous la direction de Luigi Ambrosio et Cédric Villani, également lauréat (en 2010) de la médaille Fields. Alessio Figalli travaille, entre autres, sur la théorie du transport optimal. Ce domaine d'étude permet de déterminer le moyen le moins coûteux pour transporter un objet d'un endroit à un autre. Les applications sont nombreuses en économie et dans l'industrie.

Peter Scholze faisait figure de grand favori pour la médaille Fields. Ce jeune mathématicien allemand de 30 ans a en effet développé des outils très puissants dans le domaine de la géométrie arithmétique, les perfectoides. Ces



De gauche à droite et de haut en bas: Caucher Birkar, Alessio Figalli, Peter Scholze et Akshay Venkatesh.

1

**SEULE FEMME
A REÇU LA MÉDAILLE
FIELDS DEPUIS SA
CRÉATION EN 1936 :
L'IRANIE MARYAM MIRZAKHANI,
DISTINGUÉE EN 2014
POUR SES TRAVAUX
SUR LA GÉOMÉTRIE
DES SURFACES DE
RIEMANN. ELLE EST
DÉCÉDÉE EN 2017.**

perfectoides sont construits à partir des nombres p -adiques, une extension abstraite des entiers naturels qui s'est révélée très utile en théorie des nombres. Depuis 2012, Peter Scholze est professeur à l'université de Bonn. Deux ans plus tôt, il avait fait sensation en simplifiant une démonstration réalisée par Michael Harris et Richard Taylor dans le cadre du programme de Langlands, la ramenant de 288 pages à seulement 37. Grâce également à ses grandes qualités humaines soulignées par ses pairs, Peter Scholze est devenu l'un des mathématiciens les plus influents du monde.

Akshay Venkatesh est né en 1981, à New Delhi, en Inde, puis a grandi en Australie. Il est professeur à l'université Stanford et, depuis cette année, à l'Institut d'études avancées de Princeton. Il travaille notamment sur la théorie des nombres. On lui doit aussi d'importantes contributions à la théorie ergodique, domaine né à la suite des travaux de Ludwig Boltzmann sur la cinétique moléculaire des gaz, au XIX^e siècle.

A noter, c'est la première fois depuis 1994 qu'aucun mathématicien français n'est récompensé. Avec près d'un quart du total des 60 médailles Fields attribuées à ce jour, la France se place juste derrière les États-Unis. ■

S. B.



ESPACE

CONQUÊTE SPATIALE
Marcello Coradini

FYP, 2018
240 pages, 20 euros

L'auteur montre bien quels aspects scientifiques, technologiques et géopolitiques sont associés à la conquête de l'espace, et c'est très instructif.

Poussés depuis des millions d'années par un inextinguible désir d'exploration, les humains ont construit des bateaux pour franchir les océans, puis des avions pour voler dans les airs. Un jour, des pionniers tels que Contantin Tsiolkovski, Robert Goddard et Hermann Oberth, en mettant au point des fusées, ont ouvert une voie vers l'espace. À l'époque de la guerre froide, fouler le sol lunaire a été désigné comme objectif politique par John Fitzgerald Kennedy, alors que l'exploration spatiale se faisait jusque-là de loin, à l'aide de lunettes! Aller décrocher la Lune, avant l'URSS, a peut-être aussi été un bon moyen pour les États-Unis d'éviter la guerre.

Et après, qu'est-il alors resté à faire?

On s'est mis à créer des robots, nous explique l'auteur, afin de découvrir des planètes hostiles et d'aller à la rencontre d'astéroïdes. Mais, malgré ces prouesses incroyablement spectaculaires si l'on y pense, l'aventure spatiale s'est banalisée. La vie des astronautes à bord de la Station spatiale internationale, par exemple, ne fait plus la une des journaux, sauf quand les médias trouvent un bon prétexte pour en parler, comme les très belles photographies de la Terre que Thomas Pesquet a réalisées en orbite.

C'est à la fin que culmine l'intérêt du livre: l'auteur, qui a notamment dirigé des programmes spatiaux de l'Agence spatiale européenne, y propose de nombreuses pistes réalistes pour prolonger le rêve spatial. Par exemple, l'idée de détourner un astéroïde vers une orbite lunaire afin que ses ressources minérales soient exploitées par des astronautes installés sur une base lunaire. Un petit ouvrage méritant la lecture.

JEAN COUSTEIX
ONERA, TOULOUSE



PROSPECTIVE

CE QUE LA SCIENCE SAIT DU MONDE DE DEMAIN
Jim Al-Khalili (dir.)

Quanto, 2018
336 pages, 17,55 euros

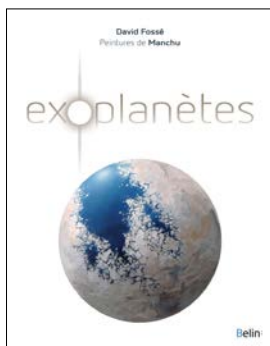
Cioran notait: «L'avantage qu'il y a à se pencher sur la vie et la mort, c'est de pouvoir en dire n'importe quoi» (*Syllogismes de l'amertume*, L'Escroc du Gouffre). Se pencher sur l'avenir offre le même avantage. Si ce livre, comme l'annonce son sous-titre, prétendait décrire «notre vie en 2050», il aurait toute latitude pour dire n'importe quoi. En 2050, qui se souciera de confronter ses prévisions avec la réalité observée?

En fait, le sous-titre est trompeur.

Dans ce livre, l'hypothétique lecteur de 2050 trouvera moins l'évocation futuriste de son monde qu'un catalogue des perplexités du monde actuel. Plus enclins à l'exposé technique qu'au lyrisme prophétique, la plupart des auteurs décrivent les questions qui se posent aujourd'hui, les espoirs et les craintes que suscitent les pistes possibles. Le livre passe en revue à peu près tous les sujets en vogue de nos jours en rapport plus ou moins direct avec le développement des techniques: climat, biosphère, médecine, génie génétique, biologie de synthèse, transhumanisme, internet des objets, cybersécurité, intelligence artificielle, ordinateurs quantiques, matériaux intelligents, robotique, téléportation...

La politique est absente. Les inventeurs, ceux qui tireront profit de leurs inventions, ceux qui les adopteront avec enthousiasme, ceux qui les subiront à contrecœur, ceux qui n'y auront pas accès – toutes ces différences sont gommées. Les gens du futur sont désignés par un «nous» indistinct. Pourtant, ce n'est pas la technique seule qui façonne le monde, mais sa conjonction avec les conflits entre les gens.

DIDIER NORDON
ESSAYISTE



ASTRONOMIE

EXOPLANÈTES

David Fossé,
Peintures de Manchu

Belin, 2018
160 pages, 26 euros

Quel est l'aspect d'une géante gazeuse en train de s'évaporer sous l'action de son soleil? À quoi ressemblerait un planète-océan? Ou le ciel d'une planète à trois soleils? Ces questions ne relèvent plus de la science-fiction, mais de la réalité astronomique.

En 1995, la découverte de la première planète extrasolaire fut un choc: deux fois plus massive que Jupiter, 51 Pegasi b tourne autour de son soleil en seulement quatre heures. Selon les modèles des astrophysiciens, elle ne devait pas exister... Vingt ans plus tard, quelque 4000 exoplanètes ont été découvertes et les modèles astrophysiques ont considérablement évolué pour rendre compte de leur extraordinaire diversité.

Cependant, trop faiblement lumineuses et plongées dans l'intense éclat de leur étoile, aucune n'a été vue directement. Leur détection résulte de l'analyse fine du spectre de leur étoile ou de la détection d'infimes fluctuations de sa luminosité. Pourtant, David Fossé, rédacteur en chef adjoint du magazine *Ciel & Espace*, et Manchu, illustre artiste de *space art*, ont relevé le défi de leur représentation. En épluchant les articles scientifiques et en décryptant les données collectées par les astrophysiciens, ils nous montrent à quoi pourraient ressembler certaines de ces planètes extrasolaires: géantes gazeuses, exo-Terres, super-Terres et mini-Neptunes. Le texte de David Fossé explique ce que l'on sait aujourd'hui de ces astres et comment les astrophysiciens les modélisent.

De son côté, Manchu doit relever de nombreux défis: comment dessiner les ombres sur une planète éclairée par plusieurs étoiles? Quelles sont les couleurs d'un coucher de soleil vu à travers une atmosphère à la composition exotique? Les peintures de Manchu sont superbes, plausibles et donnent à voir autant qu'à imaginer ces mondes. Beau dialogue entre art et science, ce livre est aussi un cocktail de rigueur scientifique et d'imagination.

ROLAND LEHOUCQ

CEA-SACLAY

PSYCHOLOGIE-ÉVOLUTION

SÉDUIRE COMME UNE BICHE

Jean-Baptiste de Panafieu
et Jean-François Marmion

La Salamandre, 2017
208 pages, 19 euros

Les lectures possibles de cet ouvrage sont doubles comme ses auteurs, dont l'un est biologiste et l'autre un journaliste spécialisé en psychologie. La première consiste à s'inspirer des stratégies du monde animal pour mieux séduire. L'autre lecture fait prendre conscience que ces stratégies de séduction complexes et très variées exercent une terrible pression de sélection sur les espèces animales. En général, l'un des sexes séduit et l'autre choisit. Le plus souvent, ce sont les mâles qui se donnent le plus de peine: ils exhibent des couleurs contrastées comme les épinoches, des attributs démesurés comme les cerfs, dansent comme les albatros, brillent comme les lucioles, se parfument, bâtissent... Les femelles apprécieront le mâle qui survit en bonne santé malgré l'énergie considérable dépensée en vue de la reproduction. Cela fait de lui un individu remarquable, doté d'un bon patrimoine génétique et de bonnes qualités adaptatives. On remarquera que dans le monde animal, l'expérience prime, en matière de séduction, sur la jeunesse. Parfois, comme chez les rainettes vertes, des opportunistes profitent de l'inattention des femelles captivées par le chant puissant et les couleurs vives des grands mâles pour s'approcher furtivement et s'accoupler malgré leur faible attractivité. Il va de soi qu'on ne recommandera pas cette tactique aux humains. Libéré de la pression des prédateurs, nous font remarquer les auteurs, l'homme peut s'inspirer de la séduction animale, mais sans aller jusqu'à s'asperger de phéromones! Pour séduire, il peut aussi faire valoir ses talents artistiques, ses compétences parentales... Un très original manuel de séduction.

AGNÈS VERRON

SEXOLOGUE, PARIS

ET AUSSI



MÉMOIRES DE NATURALISTES Eric Buffetaut

Le Cavalier Bleu, 2018
176 pages, 20 euros

Qui a envie de profiter un peu de la belle plume vivante et amusante d'un drôle d'oiseau, c'est-à-dire d'un naturaliste? Dans ce petit ouvrage composé à partir d'articles parus dans la revue *Espèces*, le paléontologue Eric Buffetaut s'intéresse aux bizarreries de ses collègues du passé. Par exemple ce régionaliste bourguignon spécialiste des dents de poissons du Trias qui tenta une alliance avec les nazis, ce médecin passionné par un énorme œuf fossile, ce rousseauiste de l'expédition de Lapérouse qui succomba sous les coups des « bons sauvages » samoans dont il vantait la bonté la veille...

LES GRANDES ÉPOPÉES QUI ONT FAIT LA SCIENCE Fabienne Chauvière

Flammarion, 2018
288 pages, 19,90 euros

Les Savanturiers, cette émission scientifique hebdomadaire de radio (sur France Inter), est l'occasion d'inviter de grands chercheurs pour évoquer ce que Fabienne Chauvière, la productrice et présentatrice, nomme les « révolutions scientifiques ». Dans ce matériau, elle a opéré une sélection et élaboré pour ce livre une série de textes élégamment écrits et portant sur le génome, le cerveau, l'intelligence artificielle, la météorologie, les origines de l'homme, la physique quantique ou la cosmologie.

QU'EST-CE QUE LA SCIENCE... POUR VOUS?

Marc Silberstein (dir.)

Matériologiques, 2017 et 2018
Tome 1: 288 pages, 15 euros
Tome 2: 336 pages, 18 euros

Dans chacun des deux tomes de cet ouvrage original, une cinquantaine de scientifiques, philosophes ou autres personnalités impliquées dans les sciences répondent à la question posée. Certains racontent l'origine de leur vocation ou leur parcours scientifique, d'autres répondent de façon plus académique et générale. Les différents textes se recoupent, se contrastent ou se complètent. Et brosent ainsi un grand tableau pointilliste de la question, dans toute sa complexité, ce qui fait l'intérêt de l'ouvrage.

LOUVRES (VAL-D'OISE)

JUSQU'AU 7 OCTOBRE 2018
Archéa
archea.roissypaysdefrance.fr

Futur antérieur



Que comprendront de notre monde les futurs archéologues du début des années 4000, en supposant que ce métier existera encore? Telle est la question sur laquelle repose cette exposition d'archéologie-fiction à la fois amusante et intellectuellement stimulante. La tâche des archéologues ne sera pas facile: dans deux mille ans, la plupart des écrits ou enregistrements actuels, qu'ils soient matériels ou électroniques, ne seront plus là pour les renseigner (à moins que leur conservation ait été soigneusement planifiée, ce qui est loin d'être garanti).

Ainsi, les futurs spécialistes du passé devront s'appuyer sur des vestiges assez rares, les matériaux utilisés à notre époque se conservant mal: une statuette d'homme à bonnet rouge portant un gobelet à libation par-ci, un fragment de fresque sur béton par-là... Tout le sel de l'exposition est de montrer combien il sera difficile d'interpréter des restes d'objets qui nous sont familiers et dont la fonction nous est évidente, mais qui, hors de leur contexte, paraîtront bien énigmatiques à nos descendants. Les erreurs qu'ils pourraient faire et qui sont illustrées ici ont, outre leur côté humoristique, l'intérêt de faire comprendre les défis auxquels est confrontée l'archéologie. ■

PARIS

JUSQU'AU 29 SEPTEMBRE 2018
Musée d'histoire de la médecine
parisdescartes.fr/CULTURE

La mesure de la vie mentale



La psychologie a elle aussi ses instruments, même s'ils sont méconnus. Cette exposition en présente quelques-uns utilisés au XIX^e siècle et au début du XX^e, parmi les plus curieux et les plus emblématiques. Certaines de ces pièces, qui font partie des collections de l'université Paris-Descartes, n'existent plus qu'en un seul exemplaire! ■

TOULOUSE

JUSQU'AU 4 NOVEMBRE 2018
Cité de l'Espace
cite-espace.com

Astronautes



Cette exposition permet à chacun de se faire une idée de la vie quotidienne des astronautes dans la Station spatiale internationale. Se laver, manger, travailler, se détendre, etc., au rythme de 16 levers et couchers de soleil par jour, le tout en apesanteur, ce n'est pas facile: présentations, décors, expériences et ateliers sensoriels le font ressentir. ■

ET AUSSI

Jeudi 13 septembre, 18 h 30
LNE - Paris 15^e
lne.fr

LA SECONDE

Dans le cadre d'une série de conférences sur les unités du Système international, qui sera bientôt redéfini, Sébastien Bize parlera de l'unité de temps et des horloges ultraprécises.

Jusqu'au 16 septembre
Musée des Beaux-Arts, Angers

musees.angers.fr

SUIVEZ LA VOIE

Une exposition sur les routes et ponts de l'Anjou romain, à la lumière des récentes recherches archéologiques sur le tracé de la voie Angers-Rennes.

Mardi 18 septembre, 17 h
Institut Pasteur de Lille
pasteur-lille.fr

LA MALADIE D'ALZHEIMER

De la recherche à la prévention, une conférence donnée par un spécialiste, Philippe Amouyel.

Mardi 25 septembre, 17 h
Acad. des sciences, Paris
academie-sciences.fr

GÉNOME ET CANCER

Académicienne et directrice du centre de recherche de l'institut Curie, Geneviève Almouzni parle d'elle et de ses travaux sur l'organisation du génome et le lien avec l'apparition des cancers.

Mardi 25 septembre, 18 h
Médiathèque José Cabanis, Toulouse

academie-air-espace.com

VIE ET EXOPLANÈTES

Une conférence de Jean-Loup Bertaux, astrophysicien émérite au CNRS, sur les possibilités de détecter des traces de vie ou de technologie avancée sur les exoplanètes.

Jusqu'au 28 octobre
La Reine Blanche, Paris
reineblanche.com

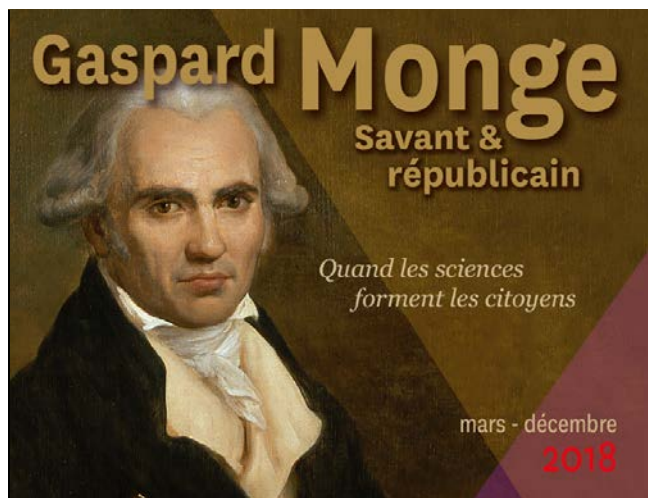
GALILÉE, LE MÉCANO

Spectacle de Marco Paolini et Francesco Nicolini, où Jean Alibert conte avec humour la vie tumultueuse du grand scientifique.

PALaiseau (ESSONNE)

JUSQU'AU 21 DÉCEMBRE 2018
Musée de l'École polytechnique
polytechnique.edu/bibliotheque

Gaspard Monge



L'année 2018 marque le bicentenaire de la mort du mathématicien Gaspard Monge. Monge n'était pas qu'un scientifique brillant, c'était aussi un promoteur des idées des Lumières qui a joué un rôle public important à l'époque de la Révolution et de la Première République. Monge est notamment devenu un proche de Bonaparte, qu'il a accompagné lors de l'expédition d'Égypte. Les diverses facettes du personnage et de sa vie sont présentées dans l'espace d'exposition qui vient d'être inauguré à la bibliothèque de l'École polytechnique – établissement que Monge a contribué à créer. ■

BAVAY (NORD)

DU 13 SEPTEMBRE 2018 AU 22 JANVIER 2019
Forum antique de Bavay
forumantique.lenord.fr

Les bronzes de Bavay

Un trésor composé de près de 370 objets en bronze a été découvert en 1969 lors de fouilles archéologiques dans le secteur nord-est de la basilique du forum de Bagaecum (aujourd'hui Bavay). Daté du tournant entre le III^e et le IV^e siècle de notre ère, cet ensemble remarquable, qui comporte des œuvres travaillées avec une grande finesse, représente l'élément majeur de la collection permanente du Forum antique de Bavay. Mais ce trésor soulevait de nombreuses questions sur sa constitution, son utilisation, son enfouissement... Aussi, depuis 2017, un grand programme d'études physico-chimiques et stylistiques a été engagé, en collaboration avec plusieurs laboratoires et spécialistes. L'exposition fait découvrir aux visiteurs, à travers les lunettes des différents domaines de spécialisation, la vision renouvelée que l'on a acquise de ces bronzes quelque peu énigmatiques. ■

BORDEAUX

JUSQU'AU 4 NOVEMBRE 2018
Cap Sciences
cap-sciences.net



Clock, les horloges du vivant

Tous les organismes vivants sont dotés de systèmes d'horloges qui rythment leur activité et leur physiologie, des cycles liés au jour et à la nuit jusqu'à l'expression des gènes. Les scientifiques ont découvert une partie des mécanismes sous-jacents à ces horloges biologiques. L'exposition se propose de faire connaître et comprendre à ses visiteurs ces rythmes du vivant, à l'aide d'expériences et de manipulations notamment. ■

SORTIES DE TERRAIN

Le 5 septembre, 9 h 30
Saint-Michel-en-Brenne
Tél. 02 54 28 12 13

UN ÉTANG... SANS EAU

Après la vidange d'un étang, on décide parfois de ne pas le remettre en eau pendant un an. Sur le fond poussent alors des plantes adaptées à ce milieu particulier, qui concerne cette année en Brenne l'étang de la Sous et l'étang Massé, et qui fait l'objet d'une visite guidée (également les 12, 19 et 26 septembre).

Le 8 septembre, 14 h 30
Caunay (Deux-Sèvres)
Tél. 06 13 44 57 76

CRIQUEUX ET SAUTERELLES

Sur la prairie humide de Moquerat, une initiation aux orthoptères.

Le 9 septembre, 14 h 30
Saint-Maurice-Navacelles
Tél. 04 67 44 64 95

BUTINEURS DU LARZAC

Le domaine de la Prunardère est un site remarquable où la diversité des insectes est grande. Cette balade vous les fera découvrir.

Mardi 11 septembre, 12 h 30
Conservatoire et jardin botaniques - Genève
Tél. (+41) 22 418 51 00

LES EUPHORBES

Une heure de visite guidée à la découverte des euphorbes, plantes souvent spectaculaires et bien connues pour leur « lait » toxique.

Le 12 septembre, 14 h
Livarot-Pays-d'Auge (14)
Tél. 02 31 62 97 54

INDICE DE BIODIVERSITÉ

Balade de 2 h 30 en bois et forêt du Calvados, où l'on verra notamment comment on détermine un indice de biodiversité.

Samedi 15 septembre, 14 h
Sonnaz (Savoie)
Tél. 04 67 52 41 22

BASES DE BOTANIQUE

Une excursion urbaine au parc de la Calamine pour faire connaissance avec les principales familles de plantes à fleurs.

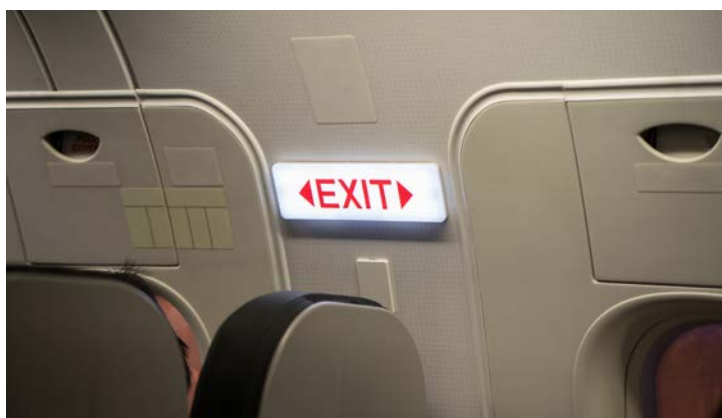




LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK

SAURIEZ-VOUS OUVRIR LA PORTE DE L'AVION?

Un étudiant en informatique ne s'approprie les principes de cette science que s'il les met en œuvre. La pratique est indispensable !



Dans un avion, le passager assis près de la sortie de secours doit lire les instructions pour ouvrir la porte. Sait-il pour autant le faire?

Quand un avion doit être évacué en urgence, le passager assis à côté d'une issue de secours est chargé de son ouverture. Mais ouvrir la porte d'un avion demande un certain savoir-faire. c'est pourquoi le personnel navigant demande à ce passager de lire, avant le décollage, un bref document décrivant la procédure.

La plupart des passagers dans cette situation lisent attentivement ce document et le reposent satisfaits. Mais sauraient-ils vraiment ouvrir la porte sans avoir, eux-mêmes, essayé la procédure au moins une fois? Un informaticien, par exemple, considère, en général, qu'après la lecture du document, il ne sait qu'à moitié comment ouvrir cette porte. J'ai essayé, un jour, d'ouvrir la porte dont j'étais responsable, pour bien comprendre, par moi-même, comment faire, mais l'hôtesse m'a hélas attribué un autre siège avant que j'aie fini ma séance de travaux pratiques.

Pourquoi un informaticien réagit-il ainsi? Parce que l'informatique ne s'apprend pas au tableau. Elle ne s'apprend pas non plus dans les livres. Cela ne signifie pas, bien entendu, que les tableaux et les livres soient inutiles: il est peu probable, par exemple, qu'un

On n'apprend pas la trompette en se focalisant seulement sur le solfège

lycéen redécouvre par lui-même l'algorithme RSA en essayant d'écrire un programme qui chiffre et déchiffre des messages. Il vaut mieux qu'il commence par apprendre le principe de cet algorithme dans un cours au tableau ou dans un livre. En revanche, il n'aura pas

complètement compris cet algorithme tant qu'il ne l'aura pas lui-même programmé et utilisé.

Cette exigence pédagogique perturbe la géométrie des universités, des lycées et des collèges. Outre des classes où les étudiants et les élèves écoutent un enseignant parler et où ils se succèdent au tableau pour faire des exercices, il faut désormais prévoir aussi des classes dans lesquelles ils travaillent en petits groupes, à des rythmes différents, parfois sur des sujets différents, et où les enseignants partagent leur temps pour les aider chacun leur tour.

Les travaux pratiques ne sont pas une forme pédagogique nouvelle, mais leur raison d'être en informatique est différente de ce qu'elle est dans les sciences de la nature. En physique, en chimie, en biologie, etc., les travaux pratiques servent avant tout à confronter les élèves à la réalité que ces sciences cherchent à décrire. Les élèves y font des expériences, pour découvrir, valider, etc., les lois de la nature. En informatique, en revanche, leur utilité vient du fait que les savoirs sont associés à de multiples savoir-faire, que les élèves ne peuvent acquérir qu'en agissant. Par exemple, apprendre qu'une boucle sert à répéter une même instruction plusieurs fois n'est pas suffisant, il faut aussi apprendre à utiliser une boucle quand on écrit un programme. De même, on n'apprend pas la trompette en se focalisant seulement sur le solfège et les doigts, il faut aussi souffler soi-même dans l'instrument. Et on n'apprend pas l'italien à partir du dictionnaire et de la grammaire, sans s'essayer à la conversation.

Le développement de l'enseignement de l'informatique aura peut-être un heureux effet secondaire: la diffusion, par porosité, de ses méthodes pédagogiques à d'autres disciplines... même s'il reste à comprendre comment des projets permettraient de mettre en pratique des connaissances acquises dans des matières comme la littérature ou l'histoire. ■

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



LA CHRONIQUE DE
GÉRALD BRONNER

QUAND LA VOITURE ÉTAIT ÉCOLOGIQUE

À son avènement, l'automobile apportait une solution à un problème sanitaire et environnemental d'importance comparable à celui qu'elle cause aujourd'hui.



Certaines grandes villes, et au premier chef Paris, ont décidé de réduire autant que possible l'utilisation de la voiture dans leurs centres : piétonnisation, transport public, vélos en location, covoiturage, ~~processus verbaux... tous les outils de la décision politique~~ – allant de l'incitation à la punition – sont bons pour réduire l'utilisation de ce qui est considéré comme une peste pour l'environnement.

Avec près de 100 millions de pièces neuves produites par an et des milliards de tonnes de dioxyde de carbone émises, il faut reconnaître que la voiture, en l'état actuel de la technologie, n'incarne pas au mieux la volonté partagée d'utiliser raisonnablement nos ressources et de réduire notre impact sur l'environnement. Ce moyen de transport représente plus facilement le phénomène d'individualisation de la vie sociale au ^{xx}e siècle et le sentiment de liberté qui l'a accompagné, la conquête du territoire, les congés payés... mais pas vraiment une avancée écologique.

Pourtant, il fut un temps où l'automobile a constitué une solution vertueuse à

un péril qui pesait sur le destin de l'humanité. Ce péril était tel qu'en 1898 on réunit à New York une conférence internationale pour trouver des solutions au problème. Celle-ci devait durer dix jours, mais, « impuissante face à la crise, la conférence déclara ses travaux infructueux et se sépara au bout de trois jours », précisait en 2007 l'urbaniste américain Eric Morris.

**Entre 1870 et 1900,
le nombre d'attelages a
progressé de 328 % dans les
grandes villes américaines**

Quel était donc ce terrible péril ? Tout simplement le cheval, dont on dit parfois qu'il est le meilleur ami de l'homme. Pourtant, quoi de plus naturel que le cheval ? Lorsqu'on imagine un décor bucolique et écologiquement vertueux, un cavalier passant dans une prairie sauvage

ne fait pas ombre au tableau. En réalité, comme souvent, tout est question de mesure.

Avant l'apparition de la voiture, le cheval était le principal moyen de transport dans les sociétés industrialisées. À New York, par exemple, pas moins de 200 000 chevaux servaient aux livraisons, à la décharge des navires, aux transports des troupes ou des pompiers... Entre 1870 et 1900, le nombre d'attelages a progressé de 328 % dans les grandes villes américaines !

Tout cela occasionnait des problèmes que l'on a du mal à imaginer aujourd'hui. Notamment des embouteillages monstres, au regard desquels les pénibles moments passés coincés dans nos voitures ne sont pas grand-chose. Des accidents mortels survenaient aussi. À l'époque, un New-Yorkais avait deux fois plus de chances de mourir d'un accident de cheval qu'il n'en a aujourd'hui à cause de la voiture.

Mais la pire calamité accompagnant l'essor du cheval comme moyen de transport était le crottin produit. À l'époque, on ne se préoccupait guère du réchauffement climatique, mais le méthane émis par ces déjections est un terrible gaz à effet de serre, comme l'ont souligné en 2009 l'économiste Steven Levitt et le journaliste Stephen Dubner. Un cheval produit en moyenne 11 kilos de crottin par jour, ce qui, multiplié par le nombre d'animaux, constituait des volumes tels qu'il fallait parfois le stocker sur des hauteurs de 20 mètres. Les vieilles maisons new-yorkaises ont des perrons surélevés non parce que c'était la mode, mais bel et bien pour éviter à leurs habitants d'être confrontés aux murs d'excréments équestres.

Si l'on ajoute à cela l'odeur, les mouches, les rats et les maladies qui les accompagnent, on comprend aisément le désastre sanitaire et écologique dû aux chevaux au début du ^{xx}e siècle. Aussi paradoxal que cela puisse paraître, *o tempora o mores*, l'apparition de la voiture a donc constitué une avancée environnementale. ■

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



DES SAVANTS SUR LES PLANCHES

(UN.E SCIENTIFIQUE)
+
(DES ARTISTES)
=
DIALOGUE

Les mardis à 20h45 → Grande salle

9 OCTOBRE

→ Les métaux, la vie et le chimiste

18 DÉCEMBRE

→ Dunes terrestres et extra-terrestres

5 FÉVRIER

→ Chromatiques bubbles, ou la danse
des films de savon

2 AVRIL

→ Jonglerie, automates et combinatoire

28 MAI

→ Face à la lumière

11 JUIN

→ La physique du petit monde

PARTENARIATS: POUR LA SCIENCE & PLUTON MAGAZINE

L'ESSENTIEL

> Longtemps, on a pensé que le cerveau et le système immunitaire n'interagissaient pas chez les individus en bonne santé.

> Ces dernières années, cependant, les neurobiologistes ont accumulé des preuves en faveur d'une connexion étroite entre les deux systèmes.

> Les méninges transmettraient des informations sur les infections cérébrales via leur réseau lymphatique.

> À l'inverse, le système immunitaire influencerait sur le comportement en envoyant des messages au cerveau via le système de drainage de ce dernier.

L'AUTEUR



JONATHAN KIPNIS
professeur de neurosciences et directeur du Centre de l'immunologie cérébrale et de la glie à la faculté de médecine de l'université de Virginie, aux États-Unis

Cerveau et immunité

Un dialogue insoupçonné

La relation entre le cerveau et le système immunitaire ? Inexistante, pensait-on, sauf dans des cas pathologiques. Or on découvre que les deux systèmes sont intimement liés. Une connexion qui influencerait l'apprentissage et le comportement social.

Pendant des décennies, les manuels de biologie ont enseigné que les deux systèmes les plus compliqués de l'organisme – le cerveau et le système immunitaire – étaient quasiment isolés l'un de l'autre. Le cerveau gèrait le fonctionnement du corps et le système immunitaire, sa défense. Chez les personnes en bonne santé, ils ne se rencontraient jamais. Seulement dans certaines maladies ou traumatismes, les cellules du système immunitaire

pénétraient dans le cerveau et, dans ce cas, l'attaquaient.

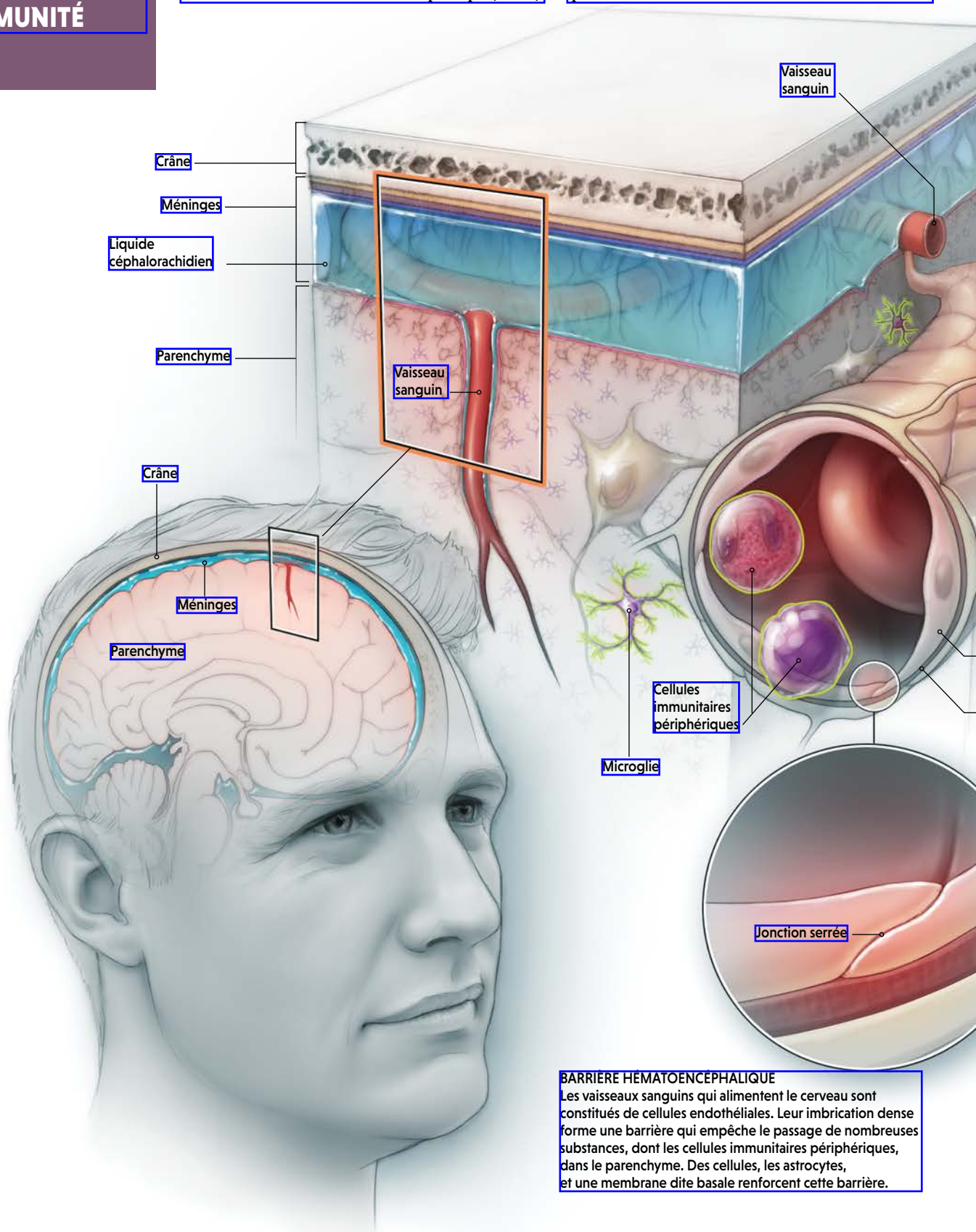
Mais ces dernières années, une série de découvertes ont révolutionné la compréhension de ces deux systèmes. Les preuves accumulées indiquent que le cerveau et le système immunitaire interagissent en permanence, que l'on soit malade ou en bonne santé. Le système immunitaire vient en renfort en cas de lésion cérébrale, par exemple. Il aide aussi le cerveau à supporter le stress et participe à des fonctions cérébrales essentielles telles que l'apprentissage et le



LA CONNEXION CERVEAU- IMMUNITÉ

Hormis ses propres cellules immunitaires, la microglie, le cerveau n'héberge pas d'autres cellules immunitaires, même si, dans les vaisseaux sanguins qui l'irrigent, de telles cellules patrouillent en permanence. Ce que l'on nomme la barrière hématoencéphalique (zoom)

empêche notamment les cellules immunitaires périphériques, issues des autres régions de l'organisme, d'y pénétrer. Néanmoins, des études récentes ont montré que non seulement le système immunitaire est très actif dans le cerveau sain, mais qu'il est aussi essentiel à son bon fonctionnement.



BARRIÈRE HÉMATOENCEPHALIQUE

Les vaisseaux sanguins qui alimentent le cerveau sont constitués de cellules endothéliales. Leur imbrication dense forme une barrière qui empêche le passage de nombreuses substances, dont les cellules immunitaires périphériques, dans le parenchyme. Des cellules, les astrocytes, et une membrane dite basale renforcent cette barrière.

CONTOURNER LA BARRIÈRE

Jusqu'à récemment, les chercheurs pensaient que les membranes entourant le parenchyme, les méninges, servaient principalement à contenir le liquide céphalorachidien qui baigne le cerveau (A). De récentes découvertes montrent que leur rôle est plus étendu (B). Les méninges contiennent des vaisseaux lymphatiques qui éliminent les toxines et autres débris et alertent le système immunitaire des infections cérébrales en lui transmettant des informations en provenance du cerveau. Les méninges hébergent aussi un assortiment de cellules immunitaires périphériques qui communiquent avec le cerveau en libérant des protéines nommées cytokines. En pénétrant dans le parenchyme via les espaces entourant les vaisseaux sanguins, le liquide céphalorachidien en provenance des méninges transporte ces cytokines au plus profond du cerveau, où elles influent sur le comportement des neurones.

Astrocyte

Cellule endothéliale

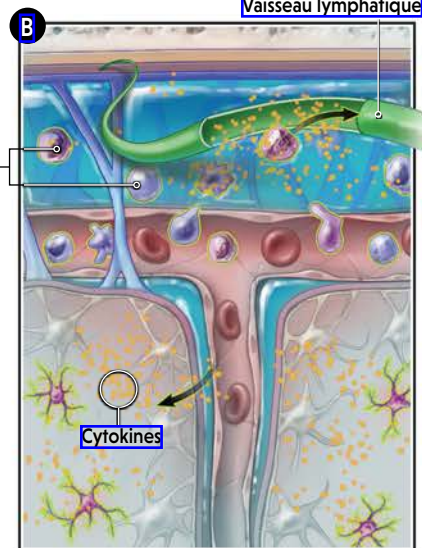
Membrane basale

Cellules immunitaires périphériques

Cytokines



Vaisseau lymphatique



comportement social. Ce n'est pas tout. Le système immunitaire serait une sorte d'organe de surveillance qui détecte les microorganismes dans le corps et autour et en informe le cerveau, tout comme nos yeux transmettent des informations visuelles et nos oreilles, des signaux auditifs. En d'autres termes, le cerveau et le système immunitaire ne se contentent pas d'interagir plus souvent qu'on ne le pensait: ils sont intimement liés.

Les chercheurs ne sont qu'aux débuts de l'exploration de ce tout jeune champ foisonnant qu'est la neuro-immunologie. Mais déjà, il apparaît clairement qu'il est porteur de nouvelles pistes thérapeutiques. La réaction du cerveau aux informations immunologiques et la façon dont ces informations contrôlent les circuits cérébraux et les affectent pourraient être la clé pour comprendre nombre de maladies neurologiques – de l'autisme à la maladie d'Alzheimer. Jusqu'à présent, les efforts pour traiter ces maladies ont récolté des résultats décevants parce que la plupart des médicaments ne pénètrent qu'avec difficulté dans le cerveau. Les études de neuro-immunologie suggèrent que cibler le système immunitaire constituerait une stratégie plus efficace – une alternative très séduisante.

UNE BARRIÈRE ET POURTANT...

Pour comprendre l'importance de ces découvertes, il est utile de connaître les bases du fonctionnement du cerveau et du système immunitaire. Le cerveau est notre ordinateur de bord et notre principal régulateur. Avec la moelle épinière et plusieurs nerfs crâniens – l'ensemble constitue le système nerveux central –, il contrôle toutes les fonctions de l'organisme. Ses unités fonctionnelles sont les neurones, qui occupent environ la moitié du cerveau.

Le cerveau humain compte près de 100 milliards de neurones que relient quelque 100 milliards de connexions, les synapses. Les neurones et divers types de cellules non neuronales, rassemblées sous le nom de glie, constituent le parenchyme cérébral, le tissu fonctionnel responsable du traitement de l'information. D'autres acteurs clés maintiennent l'intégrité de cette structure: les cellules stromales supportent les tissus parenchymateux, et les cellules endothéliales composent la paroi des vaisseaux sanguins qui alimentent le cerveau. Elles forment la barrière hématoencéphalique qui limite le passage des substances des autres régions de l'organisme vers le cerveau.

De son côté, le système immunitaire a deux composantes principales: l'immunité innée et l'immunité acquise. L'immunité innée est l'élément le plus primitif. Apparue il y a environ un milliard d'années chez les premières cellules, elle détecte et détruit les forces ennemies rapidement, mais sans grande précision. C'est la première ligne de défense de l'organisme

▢ contre les agents pathogènes, constituée de barrières physiques et chimiques et de cellules tueuses. L'immunité innée déclenche la réaction inflammatoire, dans laquelle les globules blancs envahissent le site d'infection et produisent des protéines qui induisent chaleur et gonflement, ce qui confine et détruit les agents pathogènes.

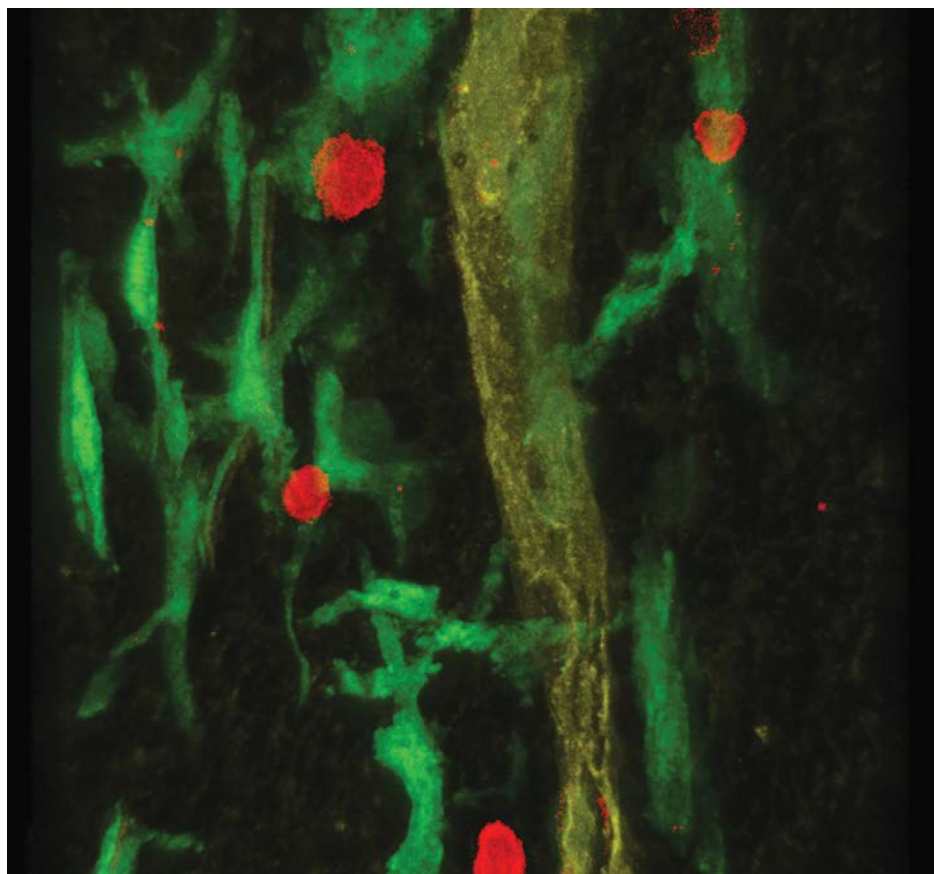
L'immunité acquise, apparue après la composante innée, englobe principalement des cellules, les lymphocytes T et B, capables de reconnaître un pathogène spécifique et de déclencher une attaque ciblée contre celui-ci. Dans un monde parfait, toutes les cellules de l'immunité acquise viseraient uniquement les agents pathogènes externes et ne toucheraient pas aux protéines ou cellules de l'organisme. Mais chez environ 1% de la population, l'immunité acquise s'emballe et attaque les cellules de l'individu, causant des maladies auto-immunes comme la sclérose en plaques, l'arthrite et certaines formes de diabète.

UN CERVEAU IMPERMÉABLE AU SYSTÈME IMMUNITAIRE ?

Les chercheurs ont longtemps pensé que le système immunitaire fonctionnait simplement en distinguant les constituants de l'organisme, le soi, et ce qui lui est extérieur, le non-soi. Mais des théories plus complexes ont commencé à émerger. Dans les années 1990, Polly Matzinger, de l'Institut américain des allergies et des maladies infectieuses, a émis l'idée que le système immunitaire reconnaîtrait non seulement les agents pathogènes étrangers, mais aussi les tissus endommagés. Cette idée s'est renforcée lorsque l'on a montré que les tissus infectés ou endommagés d'une manière ou d'une autre libèrent des signaux captés par le système immunitaire. Ces molécules alertent les cellules immunitaires, déclenchant une cascade d'événements qui mène à l'activation du système immunitaire, au recrutement de cellules immunitaires sur le site lésé et à l'élimination (ou du moins une tentative d'élimination) de l'envahisseur ou de la lésion.

Par ailleurs, des expériences ont montré qu'en supprimant l'immunité acquise, on accélère le développement et la croissance des tumeurs et on ralentit la guérison des tissus endommagés. Ces études ont révélé que le champ d'action du système immunitaire est bien plus vaste que la simple protection de l'organisme contre les agents pathogènes étrangers: il aide les tissus de l'organisme à maintenir l'équilibre face à toutes sortes d'agressions, extérieures comme intérieures.

Mais jusqu'à récemment, les scientifiques étaient certains que le cerveau se tenait hors de son périmètre. Dès les années 1920, des chercheurs ont observé qu'à part des cellules immunitaires natives du système nerveux – la microglie –, le cerveau n'héberge en général pas



Les méninges, les membranes qui enveloppent le cerveau, ne sont pas juste un réservoir de liquide céphalorachidien. Elles contiennent des cellules du système immunitaire (en rouge, des lymphocytes T, en vert des macrophages) et des vaisseaux lymphatiques (en jaune).

de cellules immunitaires provenant d'autres régions de l'organisme (cellules immunitaires dites périphériques). La barrière hématoencéphalique les maintient à l'écart. Dans les années 1940, le biologiste britannique Peter Medawar, qui a reçu un prix Nobel pour ses recherches, a montré que l'organisme est plus lent à rejeter un tissu étranger greffé sur le cerveau que dans d'autres régions. Pour Medawar, le cerveau était «immunoprivilégié», imperméable au système immunitaire.

Pourtant, des cellules immunitaires périphériques apparaissent dans le parenchyme et la moelle épinière de patients présentant des infections ou des lésions cérébrales. Et des études chez la souris montraient que ces cellules causaient la paralysie associée à ces maladies. S'appuyant sur ces résultats, des scientifiques ont suggéré que le cerveau et le système immunitaire n'avaient rien à faire l'un avec l'autre, sauf dans certaines pathologies qui laissent les cellules immunitaires entrer dans le système nerveux central et déclarer la guerre aux neurones.

Aujourd'hui, on ne sait d'ailleurs toujours pas exactement comment les cellules immunitaires franchissent la barrière hématoencéphalique dans de tels cas. Une hypothèse est que pendant ces maladies, la barrière serait activée de telle façon qu'elle autorise le passage des cellules immunitaires. Dans une étude publiée en 1992,

Lawrence Steinman, de l'université Stanford, et ses collègues ont découvert que chez des souris atteintes d'une maladie similaire à la sclérose en plaques, les cellules immunitaires périphériques fabriquent une protéine, l'intégrine $\alpha 4 \beta 1$, qui leur permet de traverser la barrière hématoencéphalique. Un médicament qui inhibe l'interaction de l'intégrine et des cellules endothéliales, le natalizumab, est l'un des traitements les plus efficaces contre la sclérose en plaques.

Mais revenons à notre histoire. Si la théorie selon laquelle le cerveau et le système immunitaire menaient des vies séparées a prévalu pendant des décennies, certains restaient sceptiques. Ils se demandaient pourquoi, si le système immunitaire est le principal rempart contre les agents pathogènes, le cerveau renoncerait à un accès facile à un tel système de défense. Les partisans de la théorie répondaient que la barrière hématoencéphalique empêche l'entrée de la plupart des agents pathogènes dans le cerveau, de sorte que ce dernier n'a pas besoin de s'accommoder du système immunitaire, surtout si celui-ci est susceptible d'y entraîner des problèmes.

Les sceptiques ont souligné que plusieurs virus, de même que certaines bactéries et parasites, sont pourtant capables d'accéder au cerveau. Et alors, loin d'ignorer ces transgressions, le système immunitaire se précipite vers ce dernier, où il tente de contrôler l'agent infectieux. Et si la rareté des agents pathogènes dans le cerveau n'était pas due à l'efficacité de la barrière hématoencéphalique à les filtrer, mais à celle du système immunitaire à les combattre? En effet, des études ont montré que les patients immunodéprimés souffrent de complications qui affectent souvent le système nerveux central.

DES CELLULES IMMUNITAIRES AU SECOURS DU CERVEAU

Finalement, ces arguments et une meilleure compréhension du rôle du système immunitaire dans la réparation des tissus endommagés ont incité des chercheurs à réexaminer sa fonction dans le système nerveux central. Lorsqu'ils ont regardé de plus près le système nerveux central de rats et de souris atteints de lésions de la moelle épinière, ils ont constaté qu'il était envahi de cellules immunitaires infiltrées. Puis, d'autres études ont indiqué que des cellules immunitaires aident les neurones au lieu de seulement les endommager, comme on le pensait auparavant.

Ainsi, dans des expériences menées à la fin des années 1990, Michal Schwartz, de l'institut Weizmann, en Israël, a montré que l'élimination des cellules immunitaires après une lésion du système nerveux central aggrave la perte de neurones et les perturbations fonctionnelles du cerveau. Puis, plus récemment, des études de Stanley Appel, du Houston Methodist

Hospital, et Mathew Blurton-Jones, de l'université de Californie à Irvine, ont révélé que la sclérose latérale amyotrophique et la maladie d'Alzheimer se développent plus sévèrement et plus vite chez des souris privées d'immunité acquise que chez des souris normales. Et qu'en restaurant l'immunité acquise, on ralentit la progression de ces maladies.

A première vue, l'intervention du système immunitaire en cas de lésion du système nerveux central paraît insensée. Certes, lorsque ce dernier subit un traumatisme, le système immunitaire met en place une réaction inflammatoire, libérant des substances toxiques qui détruisent les agents pathogènes et, dans certains cas, éliminent les cellules endommagées, ce qui rétablit l'équilibre. Mais la réaction inflammatoire est un instrument grossier qui supprime de bons éléments avec les mauvais. Dans d'autres tissus, de tels dommages collatéraux sont tolérables, car les tissus se régénèrent facilement. Toutefois, dans le système nerveux central, la capacité du tissu à repousser est limitée, ce qui signifie que les dommages dus à la réaction immunitaire sont en général permanents.

Vu la capacité de l'activité immunitaire à abîmer le cerveau, les coûts de son intervention surpassent probablement souvent ses avantages.

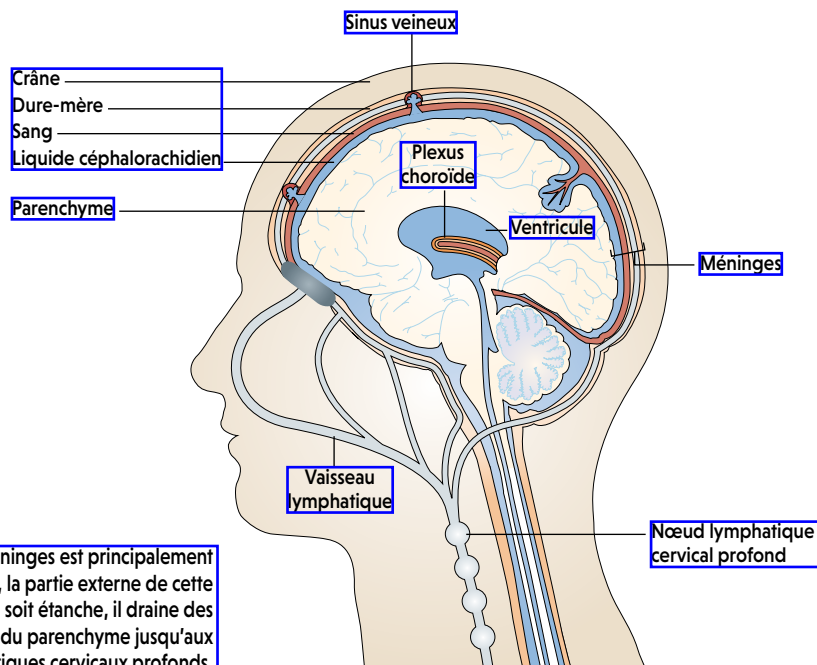
A priori, l'intervention du système immunitaire en cas de lésion du cerveau paraît insensée

Mais peut-être la réaction immunitaire observée après une lésion du système nerveux central est-elle simplement une extension de celle qui, dans des conditions normales, aide juste le cerveau à fonctionner?

Des études récentes soutiennent cette idée, notamment une que j'ai menée avec Hagit Cohen, de l'université Ben Gourion, en Israël, et Michal Schwartz. Dans cette étude, nous avons observé que des souris ayant subi des stimuli stressants, comme l'exposition à l'odeur de leurs prédateurs naturels, développaient une réaction immédiate au stress: elles se cachaient dans un labyrinthe au lieu de l'explorer. Dans 90% des cas, cette réaction disparaissait en quelques heures ou quelques jours. Mais pour

UN RÉSEAU LYMPHATIQUE BIEN MYSTÉRIEUX

Le réseau lymphatique des méninges est principalement situé dans la dure-mère, la partie externe de cette enveloppe. Bien que celle-ci soit étanche, il draine des molécules et des cellules issues du parenchyme jusqu'aux nœuds lymphatiques cervicaux profonds.



Si aujourd'hui, il apparaît clairement que le système glymphatique et celui des vaisseaux lymphatiques des méninges sont tous deux des acteurs clés du drainage du système nerveux central et de son dialogue avec le système immunitaire, de nombreuses zones d'ombre demeurent. Notamment, on ne sait pas exactement comment ces deux systèmes communiquent avec le système nerveux central.

Par exemple, des études ont montré que les vaisseaux lymphatiques des méninges recapturent des macromolécules fluorescentes injectées dans le parenchyme. Mais où exactement a lieu cette recapture? D'autant que leur étude anatomique a révélé qu'ils sont majoritairement situés dans la dure-mère, la partie extérieure et étanche des méninges.

Contrairement au circuit sanguin, le système lymphatique est un réseau ouvert. Muni de multiples terminaisons, il pénètre dans la plupart des tissus de l'organisme, où il contribue au maintien de l'équilibre et à la veille immunitaire en absorbant des macromolécules, des cellules immunitaires et le surplus du liquide qui baigne les tissus, le liquide interstitiel. Tous ces éléments sont drainés vers un tube collecteur – un vaisseau lymphatique plus gros qui les centralise et les réinjecte dans la circulation sanguine *via* la veine cave.

Les vaisseaux lymphatiques que l'équipe de Jonathan Kipnis a découverts

dans les méninges il y a quelques années, eux, courent principalement le long des artères de la dure-mère et des nerfs crâniens qui la parcourent, ainsi que dans de larges sinus veineux traversant la dure-mère. Et plus on descend vers la base du crâne, plus le réseau est étendu, sans doute à cause de son mode de croissance. Au cours du développement en effet, les vaisseaux lymphatiques des méninges apparaissent plus tard que le réseau classique: les premiers se for-

rejoignent le tube collecteur. Mais comment ces éléments sont-ils entrés dans les vaisseaux lymphatiques? Jonathan Kipnis propose l'existence de points précis de recapture, mais personne n'a encore confirmé leur existence. Il est aussi possible que le réseau lymphatique communique directement avec le système glymphatique: plusieurs équipes ont montré que l'ablation des vaisseaux lymphatiques des méninges ralentit le drainage de traceurs injectés dans le cerveau. Cela confirme la continuité des deux réseaux et suggère que ces vaisseaux drainent, au moins en partie, les fluides interstitiels cérébraux.

Seule une étude précise de la topographie de ces deux circuiteries et de leur fonctionnement apportera des réponses. Il est probable qu'elle réserve des surprises. Avec l'équipe d'Anne Eichmann, de l'unité Inserm U970, à l'hôpital européen Georges-Pompidou, et de l'université Yale, notre équipe a récemment découvert un nouveau réseau de vaisseaux lymphatiques le long de la colonne vertébrale, lequel rejoint le système collecteur périphérique en suivant les nerfs de la moelle épinière. Il constitue non seulement une extension du réseau des méninges, mais aussi un circuit d'évacuation pour les fluides périnerveux, et un lien avec le système nerveux périphérique et le système immunitaire.

JEAN-LÉON THOMAS
Institut du cerveau et de la moelle épinière, Inserm, université Yale

Comment les cellules immunitaires entrent-elles dans les vaisseaux lymphatiques?

ment à la naissance, à la base du crâne, puis s'étendent peu à peu jusqu'à son sommet, guidés le long des vaisseaux sanguins par une protéine (le facteur de croissance VEGF-C) que produisent les cellules musculaires entourant ces vaisseaux.

Ce réseau s'est révélé transporter des macromolécules et des cellules immunitaires issues du liquide qui baigne le cerveau, le liquide céphalo-rachidien, jusqu'à des ganglions situés à la base du cerveau, les nœuds lymphatiques cervicaux profonds, d'où ils

Les 10% restants, elle persistait des jours, voire des semaines. Lorsque nous avons reproduit cette expérience avec des souris dépourvues d'immunité acquise, le nombre de celles où la réaction persistait a considérablement augmenté. Ces résultats ont fourni la première indication que le système immunitaire soutient le cerveau non seulement lors d'infections et de lésions, mais aussi lors d'un stress psychologique. Par ailleurs, d'autres travaux suggèrent un lien entre le système immunitaire et le syndrome de stress post-traumatique, dont nos souris aux réactions prolongées au stress constituent des modèles.

Bien que moins angoissantes que l'exposition à un prédateur, les tâches nécessitant un apprentissage sont elles aussi stressantes. Imaginez que vous préparez un examen ou même cuisinez une nouvelle recette. Une incapacité à gérer le stress entraverait-elle le processus d'apprentissage lui-même? Pour tester cette hypothèse, mes collègues et moi avons comparé la performance de souris dépourvues d'immunité acquise à celle d'un groupe de souris normales dans divers tests comportementaux. Nous avons constaté que, contrairement aux autres, les souris sans immunité acquise réussissaient mal les tâches nécessitant un apprentissage de la mémoire spatiale, comme la localisation d'une plateforme cachée dans un grand bassin d'eau. Nous avons depuis montré que les souris dépourvues d'immunité acquise présentent non seulement un comportement altéré d'apprentissage spatial, mais aussi un comportement social perturbé, préférant passer leur temps avec un objet inanimé plutôt qu'avec une autre souris.

LA PISTE DES CYTOKINES

Tandis que les preuves s'accumulaient, montrant que le système immunitaire joue un rôle important dans différentes fonctions cérébrales, de nouvelles inconnues ont émergé. Notamment, comment le système immunitaire influe-t-il sur le système nerveux central? Après tout, en dehors de la microglie, aucune cellule immunitaire n'est présente dans le parenchyme des individus en bonne santé. Des protéines, les cytokines, ont fourni un indice. Produites par les cellules immunitaires, ces molécules influent sur le comportement d'autres cellules. Or les cytokines que libèrent les cellules immunitaires périphériques sont capables de perturber le cerveau.

Elles pénétreraient dans des zones du cerveau dépourvues de la barrière hématoencéphalique habituelle ou atteindraient directement le cerveau *via* le nerf vague, qui s'étend du cerveau à l'abdomen. D'autres travaux suggèrent par ailleurs que des cellules immunitaires détectées dans les méninges – les membranes qui entourent le cerveau – seraient une autre

source possible de cytokines susceptibles d'affecter la fonction cérébrale. Comment ces cellules immunitaires pénètrent-elles dans les méninges, y circulent-elles et y produisent-elles leurs cytokines? Toutes ces questions font actuellement l'objet d'intenses recherches.

Récemment, nous avons fait une découverte intrigante à ce sujet. Elle concerne la façon dont l'organisme se débarrasse des toxines et des déchets. Les tissus contiennent deux types de vaisseaux. Dans une maison, un réseau de tuyaux distribue l'eau potable et un autre récupère les eaux usées. De même, dans nos tissus, les vaisseaux sanguins transportent l'oxygène et les nutriments, tandis que les vaisseaux lymphatiques éliminent les toxines et autres déchets que produisent les tissus.

Il existerait un lien entre immunité et syndrome de stress post-traumatique

Les vaisseaux lymphatiques transportent aussi des antigènes – des substances capables d'induire une réponse immunitaire – récupérés dans les tissus jusqu'à des ganglions lymphatiques drainants. Les cellules immunitaires inspectent alors ces antigènes à la recherche d'informations sur le tissu drainé. Lorsqu'elles détectent un problème, une lésion ou une infection, par exemple, elles s'activent et migrent vers le tissu touché, où elles tentent de résoudre le problème.

Longtemps, les scientifiques ont pensé que le réseau lymphatique ne desservait ni le cerveau ni le reste du système nerveux central: le parenchyme ne contient pas de vaisseaux lymphatiques, et on croyait toujours que le cerveau sain était déconnecté du système immunitaire. Pourtant, cette hypothèse soulevait une énigme: pourquoi le cerveau n'aurait-il pas signalé ses problèmes au système immunitaire, alors que celui-ci aurait pu l'aider à les résoudre? Et comment le système immunitaire recevait-il malgré tout des informations sur les infections cérébrales? En outre, des études avaient montré que les lésions cérébrales déclenchent une forte réaction immunitaire dans des ganglions

► Lymphatiques situés à l'extérieur du cerveau. Comment était-ce possible?

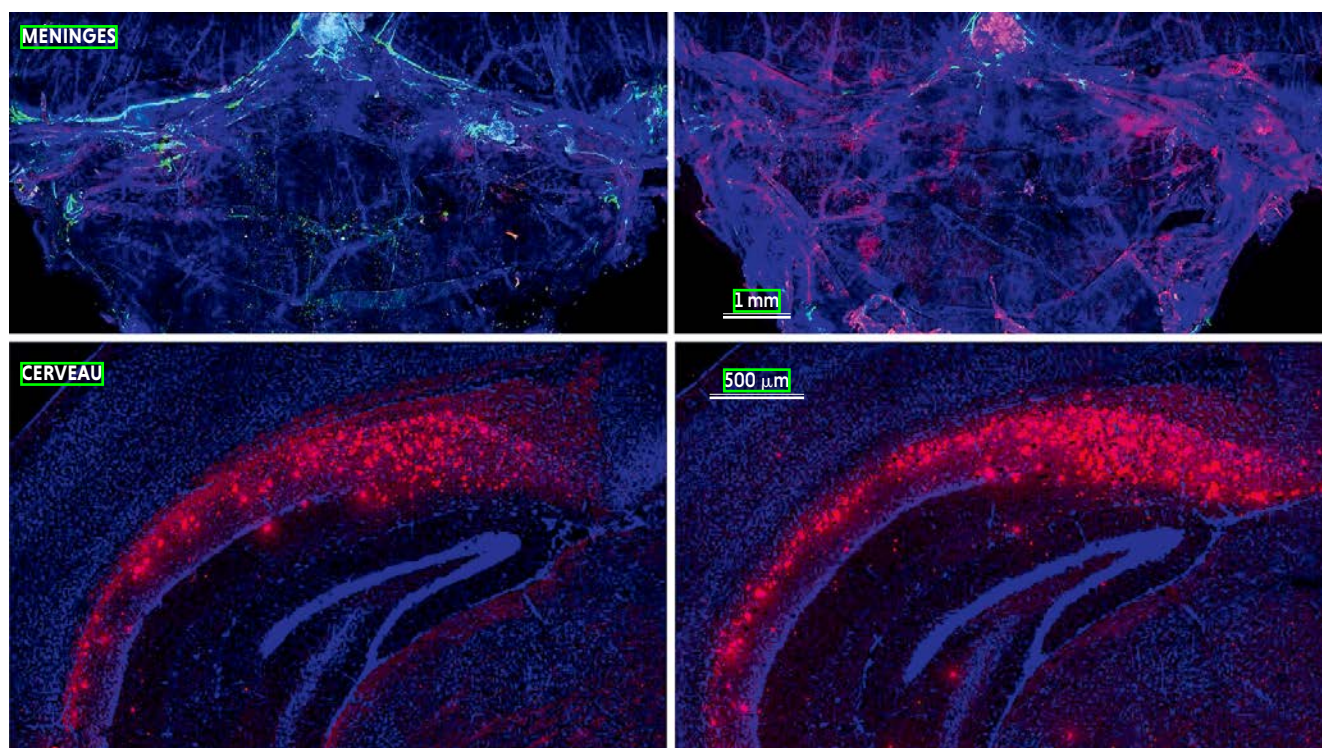
En 2014, fasciné par l'activité immunitaire dans les méninges et ses effets sur la fonction cérébrale, nous avons décidé de regarder ces membranes de plus près chez la souris. Ce faisant, nous avons fait une découverte fortuite: ces membranes se sont révélées héberger des vaisseaux lymphatiques. Plusieurs autres équipes, notamment celle de Kari Alitalo, à l'université d'Helsinki, en Finlande, ont depuis observé des vaisseaux similaires chez des poissons, des souris, des rats, des primates non humains et des humains. Ces résultats confirment une proposition formulée il y a 200 ans, mais rejetée à l'époque: l'existence d'un lien entre cerveau et système lymphatique. Ces vaisseaux constituent un véritable réseau lymphatique qui draine le système nerveux central, un chaînon manquant capable de transmettre au système immunitaire les informations sur les infections et lésions du cerveau.

La présence de vaisseaux lymphatiques et de cellules immunitaires dans les méninges implique que les chercheurs repensent la fonction de ces membranes. Selon la conception classique, elles contiennent simplement le liquide céphalorachidien, qui baigne le cerveau. Mais vu la densité de cellules dans ce dernier et la sensibilité des neurones, il est possible que l'évolution ait privilégié une solution qui déplace l'activité immunitaire du cerveau à ses frontières, les méninges – solution où le système immunitaire sert le système nerveux central sans pour autant interférer avec la fonction neuronale.

La découverte des vaisseaux lymphatiques du cerveau a révélé comment le système immunitaire reçoit des informations sur les lésions tissulaires du système nerveux central. Toutefois, c'est une autre branche du système d'élimination des déchets cérébraux qui a permis de comprendre comment, à l'inverse, les cellules immunitaires des méninges communiquent avec le parenchyme et agissent sur lui à distance. Le liquide céphalorachidien contenu dans les méninges accède au cerveau *via* un réseau de canaux qui traversent le parenchyme. Maiken Nedergaard, de l'université de Rochester, à New York, dont l'équipe a découvert ce réseau en 2012, l'a nommé le système glymphatique. Le liquide pénètre dans le parenchyme à travers des espaces entourant les artères qui s'enfoncent dans le cerveau à partir des méninges. Il diffuse dans les tissus jusqu'à atteindre des espaces entourant les veines. *Via* ces espaces, il retourne alors dans les méninges. Cet écoulement transporte vraisemblablement des molécules immunitaires issues des méninges, telles des cytokines, jusqu'au parenchyme, où elles exercent leur influence.

Diverses études ont révélé comment des cytokines modulent le comportement. Notamment, au début des années 1990, Robert Dantzer, alors au sein d'une unité Inra-Inserm à Bordeaux, et Keith Kelley, à l'université de l'Illinois à Urbana-Champaign, avaient déjà déterminé que l'interleukine 1 β déclenche le «comportement maladie», nom donné à l'ensemble des comportements d'un individu malade, comme dormir trop, manger moins et éviter les interactions sociales.

Chez des souris modèles de la maladie d'Alzheimer, des plaques amyloïdes (des agrégats de protéines qui détruisent les neurones, *en rouge*) s'accumulent dans le cerveau et peu dans les méninges (*à gauche*). L'équipe de Jonathan Kipnis vient de montrer que quand on élimine les vaisseaux lymphatiques des méninges (*en bleu ciel*), l'accumulation de plaques est plus importante (*à droite*) et ressemble à celle observée chez les patients atteints de la maladie. De plus, si l'on traite des souris âgées avec une protéine qui favorise la croissance des vaisseaux lymphatiques, VEGF-C, le drainage lymphatique est meilleur dans les méninges, et les souris apprennent et mémorisent mieux. Une piste pour lutter contre le déclin cognitif lié à l'âge?



Plus récemment, en 2016, mon équipe a montré que l'interféron γ , une cytokine que produisent des lymphocytes T des méninges, interagit avec les neurones du cortex préfrontal, une région du cerveau impliquée notamment dans le comportement social. Curieusement, cette cytokine n'agit pas *via* les cellules immunitaires qui résident dans le cerveau, la microglie, mais *via* des neurones contrôlant les circuits associés au comportement social. En fait, elle est essentielle au fonctionnement de ces circuits: en l'absence de lymphocytes T ou de l'interféron γ , ces neurones ne régulent pas correctement les circuits, qui deviennent alors hyperactifs – une perturbation associée à des déficits sociaux. Ainsi, une cytokine que des cellules immunitaires produisent dans les méninges est capable de modifier l'activité des neurones, altérant la fonction du circuit neuronal associé et modifiant le comportement sous-jacent.

L'interféron γ n'est pas la seule cytokine qui perturbe la fonction cérébrale. Mario de Bono, du laboratoire de biologie moléculaire MRC, à Cambridge, en Angleterre, et ses collègues ont montré qu'une autre, l'IL-17, active les neurones sensoriels chez le ver *Caenorhabditis elegans* et modifie son comportement de détection de l'oxygène. Et des travaux récents de Gloria Choi, de l'institut de technologie du Massachusetts, et ses collègues, ont prouvé chez la souris que l'IL-17 est capable d'interagir avec les neurones du cortex cérébral et de modifier des comportements liés au trouble du spectre autistique.

INFORMER LE CERVEAU

On peut se demander pourquoi un organe aussi puissant que le cerveau a besoin du soutien du système immunitaire pour fonctionner. J'ai développé une hypothèse pour expliquer pourquoi les deux systèmes sont si étroitement liés. Nous avons cinq sens établis: l'odorat, le toucher, le goût, la vue et l'ouïe. Le sens de la position et du mouvement, ou proprioception, est souvent appelé le sixième sens. Ces sens rendent compte au cerveau de nos environnements externe et interne, fournissant ainsi une base sur laquelle il détermine l'activité nécessaire à la survie. Les microorganismes abondent dans ces environnements, et la capacité de les détecter – et de s'en défendre si nécessaire – est elle aussi essentielle. Or notre système immunitaire excelle précisément dans ces tâches. Je propose que son rôle déterminant soit de détecter les microorganismes et d'en informer le cerveau. Si, comme je le prédis, le système immunitaire est connecté au cerveau, cela en ferait un septième sens.

Il existe des moyens de tester cette hypothèse. Comme tous les circuits du cerveau sont interconnectés, une interférence avec l'un d'eux tend à perturber les autres. Par exemple, la nourriture a un goût différent lorsque notre

odorat est altéré. Si l'on montre qu'une interférence avec l'immunité perturbe d'autres circuits, on aura un argument en faveur de l'idée que la réaction immunitaire est un septième sens. Le comportement maladie fournit une

Le système immunitaire excelle à détecter les microorganismes. Est-il un septième sens?

piste dans ce sens. Il se pourrait que, lors d'une maladie, l'afflux massif de signaux du septième sens informant le cerveau de l'infection déborde et perturbe les circuits qui modulent le sommeil, la faim, etc., conduisant à ce syndrome. Alternativement, l'information sur les microorganismes que le système immunitaire relaye au cerveau pourrait inciter le cerveau à déclencher un comportement maladie – lequel protégerait l'individu malade en minimisant son exposition à d'autres agents pathogènes et en économisant son énergie.

Notre connaissance du lien entre le cerveau et le système immunitaire n'en est qu'à ses débuts. Il est possible que les dix ou vingt prochaines années révèlent ces deux systèmes sous un jour complètement différent. J'espère, cependant, que ces avancées ne renverseront pas notre compréhension actuelle, mais la préciseront. Une priorité consistera à cartographier comment les composants immunitaires et les circuits neuronaux sont connectés, interagissent et sont interdépendants en matière de santé et de maladie. La connaissance de ces relations permettra de cibler la signalisation immunitaire dans la recherche de traitements contre les troubles neurologiques et mentaux. Il est plus facile de cibler le système immunitaire que le système nerveux central. Qui sait, peut-être traitera-t-on un jour les maladies cérébrales en réparant le système immunitaire par thérapie génique ou même en remplaçant un système immunitaire défectueux au moyen d'une greffe de moelle osseuse? Par ailleurs, une myriade de perturbations immunitaires accompagnent les troubles cérébraux. Cette diversité recèle peut-être encore d'autres surprises sur le fonctionnement du cerveau... ■

BIBLIOGRAPHIE

S. Da Mesquita et al., **Functional aspects of meningeal lymphatics in ageing and Alzheimer's disease**, *Nature*, en ligne le 25 juillet 2018.

J. Kipnis, **Immune system : The « seventh sense »**, *J. Exp. Med.*, vol. 215(2), pp. 397-398, 2018.

S. Antila et al., **Development and plasticity of meningeal lymphatic vessels**, *J. Exp. Med.*, vol. 214(12), pp. 3645-3667, 2017.

J. Kipnis, **Multifaceted interactions between acquire immunity and the central nervous system**, *Science*, vol. 253, pp. 766-771, 2016.

M. Nedergaard et S. A. Goldman, **Comment le cerveau évacue ses déchets**, *Pour la Science*, n° 467, pp. 58-63, 2016.

A. Louveau et al., **Structural and functional features of central nervous system lymphatic vessels**, *Nature*, vol. 523, pp. 337-341, 2015.

L'ESSENTIEL

> Dans l'Univers lointain, on observe des quasars, des galaxies très brillantes dont le centre est occupé par un trou noir supermassif.

> On comprend mal comment de tels monstres se sont formés en moins de un milliard d'années après le Big Bang.

> Selon un scénario proposé récemment, ces trous noirs seraient issus de l'effondrement de vastes nuages de gaz primordiaux.

> Le futur télescope spatial James-Webb, prévu pour 2020, devrait détecter certaines signatures caractéristiques de ce scénario.

L'AUTEURE



PRIYAMVADA NATARAJAN
astrophysicienne
à l'université Yale,
aux États-Unis

Le paradoxe des jeunes quasars

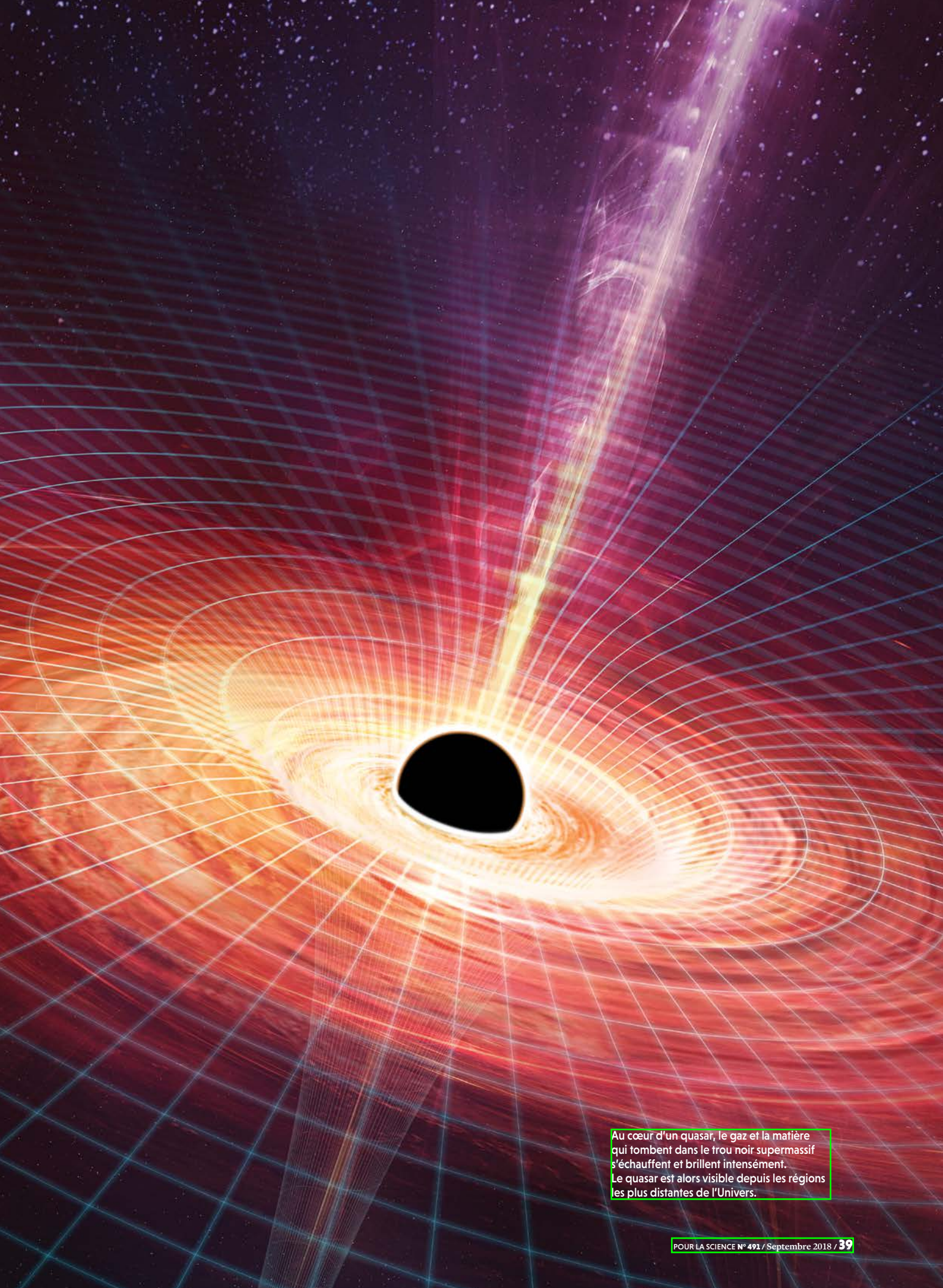
Des trous noirs supermassifs occupent le centre des quasars les plus anciens, objets nés moins de un milliard d'années après le Big Bang. Mais les astrophysiciens ignorent comment ces trous noirs ont pu grandir autant en si peu de temps. Une énigme qu'un scénario récemment proposé pourrait résoudre.

Lorsqu'on observe le ciel la nuit, on y voit des étoiles, des galaxies... Il n'en a pas toujours été ainsi. Ces objets ont mis, après le Big Bang, des centaines de millions d'années à se former.

L'Univers était initialement rempli d'un mélange chaud et dense de particules, qui s'est progressivement refroidi du fait de son expansion. Environ 380 000 ans après le Big Bang, les noyaux atomiques et les électrons se sont associés pour constituer des atomes neutres, emplissant tout l'espace d'un gaz d'hydrogène (et d'hélium). Quelques centaines de millions d'années plus tard, le gaz s'est effondré sur lui-même, ce qui a formé les premières étoiles. Celles-ci se sont rassemblées au sein des galaxies, dont les plus anciennes traces datent de 400 millions d'années après la naissance de l'Univers. Mais les astrophysiciens ont aussi eu la surprise de voir qu'une autre classe d'objets est apparue à peu près à cette période: les quasars.

Les quasars sont des galaxies où de grandes quantités de gaz tombent dans le trou noir supermassif situé en leur centre. En raison des frottements internes, le gaz s'échauffe et émet de la lumière. Ainsi, les quasars sont parmi les objets les plus brillants de l'Univers et sont visibles depuis les régions les plus reculées du cosmos. À partir de 2001, grâce au programme de relevé astronomique SDSS (*Sloan Digital Sky Survey*), les astronomes ont commencé à voir des quasars dans l'Univers très jeune. Le plus vieux quasar connu, détecté en décembre 2017, était présent seulement 690 millions d'années après le Big Bang.

La formation de ces quasars les plus anciens est une énigme pour les chercheurs. Pour être visibles alors qu'ils sont extrêmement lointains, les quasars doivent héberger des trous noirs particulièrement massifs, d'environ un milliard de fois la masse du Soleil. Or les théories classiques de formation et de croissance des trous noirs sont incapables d'expliquer



Au cœur d'un quasar, le gaz et la matière qui tombent dans le trou noir supermassif s'échauffent et brillent intensément. Le quasar est alors visible depuis les régions les plus distantes de l'Univers.

comment des trous noirs aussi gros se seraient formés en moins de un milliard d'années.

De nombreux astronomes pensent que les premiers trous noirs – les trous noirs «graines» – sont les restes de l'explosion en supernova des premières générations d'étoiles. Mais de tels trous noirs ne devraient pas avoir une masse de plus de quelques centaines de masses solaires. Il est alors difficile d'imaginer un scénario dans lequel les trous noirs supermassifs des quasars ont grandi à partir de précurseurs aussi petits.

Pour résoudre cette énigme, avec des collègues, j'ai proposé une piste où les trous noirs gagnent assez en masse pour expliquer les premiers quasars sans invoquer la naissance et la mort d'étoiles. À la place, ces trous noirs se seraient formés directement à partir du gaz d'hydrogène. Nous les nommons trous noirs à effondrement direct. Dans un environnement favorable, ces trous noirs à effondrement direct seraient nés avec une masse comprise entre 10 000 et 100 000 masses solaires quelques centaines de millions d'années après le Big Bang. Bien plus massifs que ceux du scénario classique, ces trous noirs ont très bien pu grandir pour atteindre 1 milliard voire 10 milliards de fois la masse du Soleil, comme dans les quasars qui intriguent depuis près de vingt ans les astronomes. Le défi est de prouver que ce scénario a bien eu lieu. Le télescope spatial *James-Webb*, dont le lancement est prévu pour 2020, devrait nous permettre de le savoir.

LES PREMIÈRES GRAINES

Les trous noirs sont des objets astrophysiques énigmatiques, des régions où la concentration de matière est si grande qu'elle déforme l'espace-temps de telle façon que même la lumière ne peut s'en échapper. Les chercheurs se sont longtemps demandé si les trous noirs étaient une simple curiosité mathématique des équations de la relativité générale d'Einstein. Avec les quasars, les astronomes observent la lumière émise par la matière qui chute dans les trous noirs, confirmant bien la réalité de ces derniers.

La plupart des trous noirs naissent de la mort d'étoiles très massives (de plus de 10 masses solaires). Au cœur d'une étoile, les atomes légers fusionnent et produisent assez d'énergie pour contrer la gravité de l'étoile qui tend à contracter cette dernière. Lorsque ce carburant nucléaire est épuisé, l'étoile s'effondre sur elle-même et déclenche une explosion cataclysmique, une supernova. L'astre laisse alors derrière lui un cœur extrêmement compact, un trou noir.

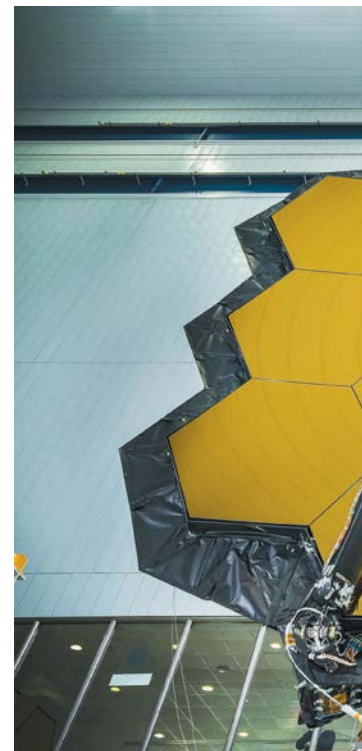
Les astronomes ont d'abord supposé que les trous noirs à l'origine des premiers quasars s'étaient aussi formés de cette façon. Ils seraient les héritiers de la première génération d'étoiles de l'Univers (les étoiles dites de population III). Ces astres se sont formés lorsque le gaz d'hydrogène s'est refroidi et a commencé à constituer

des zones de surdensité, 200 millions d'années après le Big Bang. Les étoiles de population III étaient probablement bien plus massives que les étoiles des générations suivantes. Elles auraient alors laissé derrière elles des trous noirs de plusieurs centaines de masses solaires. Et comme ces étoiles se seraient formées dans des amas denses, il est possible que les trous noirs produits lors de leur mort ont fusionné entre eux pour donner naissance à des trous noirs de plusieurs milliers de masses solaires. Mais même de tels trous noirs restent très insuffisants pour alimenter le cœur des quasars.

D'autres théoriciens suggèrent que des trous noirs primordiaux auraient émergé même plus tôt dans l'histoire de l'Univers, quand l'espace subissait une expansion exponentielle lors d'une brève phase cosmique nommée inflation. De petites fluctuations de densité dans l'Univers auraient été amplifiées durant l'inflation pour produire ces trous noirs primordiaux. Cependant, ces trous noirs devaient avoir une masse comprise entre 10 et 100 masses solaires, d'où le même problème que le cas des étoiles de population III.

Les explications proposées dans ces deux scénarios sont confrontées au même obstacle : les trous noirs graines peuvent grandir en absorbant de la matière, mais ils devraient le faire à un rythme extraordinaire pour atteindre la masse des trous noirs centraux des quasars durant le premier milliard d'années de l'histoire cosmique et ainsi créer les premiers quasars. Et ce que nous savons de la croissance des trous noirs nous permet de penser que ce scénario est peu probable.

Notre compréhension actuelle de la physique suggère qu'une grandeur, la limite d'Eddington, est le rythme maximal auquel un trou noir gagne de la masse de façon efficace. Un trou noir se nourrissant au rythme indiqué par la limite d'Eddington aurait une croissance exponentielle : sa masse doublerait tous les 10 millions d'années environ. Dès lors, pour atteindre 1 milliard de masses solaires, un trou



**À la limite d'Eddington,
un trou noir double
de masse tous
les 10 millions d'années**



noir graine de 10 masses solaires devrait avaler du gaz et des étoiles à la limite d'Eddington pendant 1 milliard d'années. Il est cependant difficile d'expliquer comment toute une population de trous noirs se serait alimentée en continu de façon aussi efficace.

Une solution possible serait d'imaginer qu'un trou noir né d'une étoile de population III se soit nourri à un rythme supérieur à la limite d'Eddington. Il est théoriquement possible de dépasser cette limite dans des conditions particulières, par exemple dans un environnement très dense et riche en gaz. De telles conditions ont pu exister dans l'Univers primordial, mais elles n'auraient pas été fréquentes, et elles n'auraient perduré que très brièvement.

En plus, une croissance exceptionnellement rapide peut provoquer une sorte d'étranglement. Lors de ces phases d'alimentation extrême, dites super-Eddington, le rayonnement émis par la matière qui tombe dans le trou noir crée une pression de radiation qui perturbe, voire bloque, le flot de matière. Le trou noir est alors privé de nourriture et arrête de grandir. Avec de telles contraintes, il est possible que ces repas gloutons expliquent quelques quasars, mais ils ne peuvent pas être la règle et rendre compte de tous les quasars que nous observons.

Les premiers trous noirs supermassifs se seraient-ils formés d'une autre façon? Inspirés par les travaux précurseurs de plusieurs équipes, mon collègue Giuseppe Lodato, de l'université de Milan, et moi-même avons publié plusieurs articles entre 2006 et 2007, dans lesquels nous

Le télescope spatial James-Webb sera assez puissant pour trouver des preuves de l'existence des trous noirs à effondrement direct. Son lancement, initialement prévu pour 2019, a été reporté d'un an.

proposons un nouveau mécanisme capable de produire, dès le début, des trous noirs graines plus massifs. Le point de départ de notre scénario consiste en de grands disques de gaz primordiaux. En général, ces disques se sont refroidis, puis se sont fragmentés et ont donné naissance aux étoiles et aux galaxies. Nous avons montré que telle n'a pas toujours été leur destinée. Si quelque chose perturbe le processus normal de refroidissement du disque et empêche la formation des étoiles, le disque devient gravitationnellement instable. La matière migre alors en grandes quantités vers le centre, de façon assez similaire à l'eau du bain qui s'écoule vers la bonde. Cet effondrement du gaz donne naissance à des trous noirs graines de 10000 à 1 million de masses solaires.

De façon générale, les disques se refroidissent plus efficacement si leur gaz est constitué d'hydrogène moléculaire (H_2 , deux atomes d'hydrogène liés) et non d'hydrogène atomique (H , constitué d'atomes isolés). Si un rayonnement émis par les étoiles d'une galaxie voisine atteint le disque, il peut briser les liaisons de l'hydrogène moléculaire et le réduire en hydrogène atomique. Le processus de refroidissement est alors ralenti et le disque reste trop chaud pour former des étoiles. Dénué d'étoiles et de température plus élevée, le disque devient instable et la matière migre vers son centre, conduisant rapidement à la formation d'un trou noir à effondrement direct.

Comme ce scénario nécessite la présence d'étoiles dans le voisinage proche du disque, nous nous attendons à ce que les trous noirs à effondrement direct se forment généralement dans des galaxies satellites évoluant autour de galaxies parents plus grandes où des étoiles de population III se seraient déjà formées.

Les simulations décrivant la formation des grandes structures et la dynamique du gaz aux plus grandes échelles cosmiques étayent les hypothèses du modèle des trous noirs à effondrement direct. Dès lors, l'idée que des trous noirs graines très massifs se soient formés dans l'Univers jeune semble plausible. En partant de telles graines, il n'y a alors plus de problème pour produire, en un temps raisonnable, des trous noirs supermassifs au cœur des quasars.

À LA RECHERCHE DE PREUVES

Le fait que les trous noirs à effondrement direct soient théoriquement possibles ne suffit pas pour affirmer que le modèle est juste. Pour le savoir, nous devons trouver des preuves observationnelles.

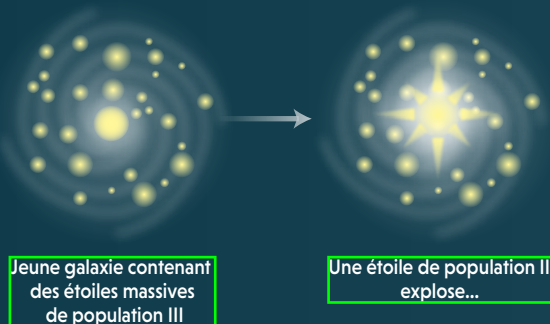
En absorbant de la matière, ces trous noirs ressembleraient à de petits quasars dans l'Univers jeune. En particulier, on s'attend à ce que cette graine fusionne avec la galaxie parent, et elle brillerait alors intensément. Cet événement serait assez fréquent car, dans notre modèle, les

COMMENT SONT NÉS LES TROUS NOIRS SUPERMASSIFS

Dans le schéma classique, la formation des trous noirs supermassifs (en haut) commence avec la mort des premières étoiles. Mais ce scénario ne semble pas pouvoir expliquer l'énorme masse des trous noirs sis au cœur des quasars les plus anciens. Des astrophysiciens ont proposé une nouvelle idée : ces trous noirs naîtraient de l'effondrement direct de nuages de gaz (en bas).

SCENARIO CLASSIQUE

Lorsque les premières étoiles (population III) ont épuisé leur carburant nucléaire, elles ont explosé en supernova, laissant derrière elles des trous noirs. En absorbant rapidement le gaz et les étoiles environnantes, ces trous noirs sont devenus beaucoup plus massifs.



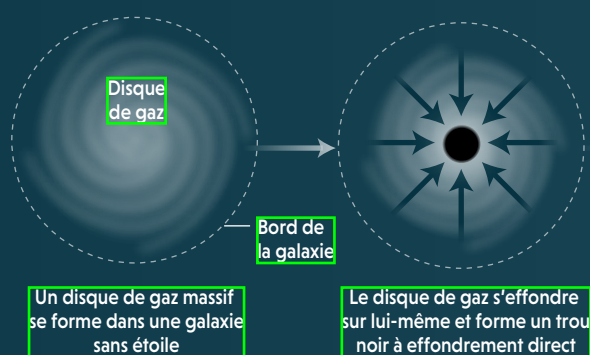
Big Bang

~ 180 millions d'années

~ 270 millions d'années

SCENARIO À EFFONDREMENT DIRECT

Si, dans une protogalaxie, la formation des étoiles est bloquée, tout le gaz pourrait s'effondrer vers le centre du disque et produire un trou noir. En entrant ensuite en collision avec une galaxie voisine, le trou noir grossirait très vite par absorption du gaz et des étoiles de cette galaxie. On obtiendrait une « galaxie à trou noir obèse », qui serait détectable par les télescopes.



➤ Les trous noirs à effondrement direct se sont formés dans des galaxies satellites de galaxies plus grandes. Une fusion galactique fournirait au trou noir graine une nouvelle source de gaz à engloutir, entretenant sa croissance. Il devrait alors se transformer rapidement en un quasar qui brille plus que toutes les étoiles de sa galaxie.

Ces trous noirs ne seraient pas seulement plus brillants que l'ensemble des étoiles environnantes, ils seraient aussi plus lourds – ce qui n'est en général pas le cas. Le plus souvent, les étoiles d'une galaxie pèsent au total plus que le trou noir central, d'un facteur 1000 environ. Mais lors de la fusion avec la galaxie parent, la masse du trou noir en pleine croissance dépasse rapidement celle des étoiles. La galaxie est alors qualifiée de galaxie à trou noir obèse. Et une telle structure devrait présenter un spectre électromagnétique particulier, notamment dans l'infrarouge, entre 1 et 30 micromètres de longueur d'onde. Or les instruments MIRI (*Mid-Infrared Instrument*) et NIRCам (*Near-Infrared Camera*) du télescope spatial *James-Webb* sont très sensibles à ces longueurs d'onde.

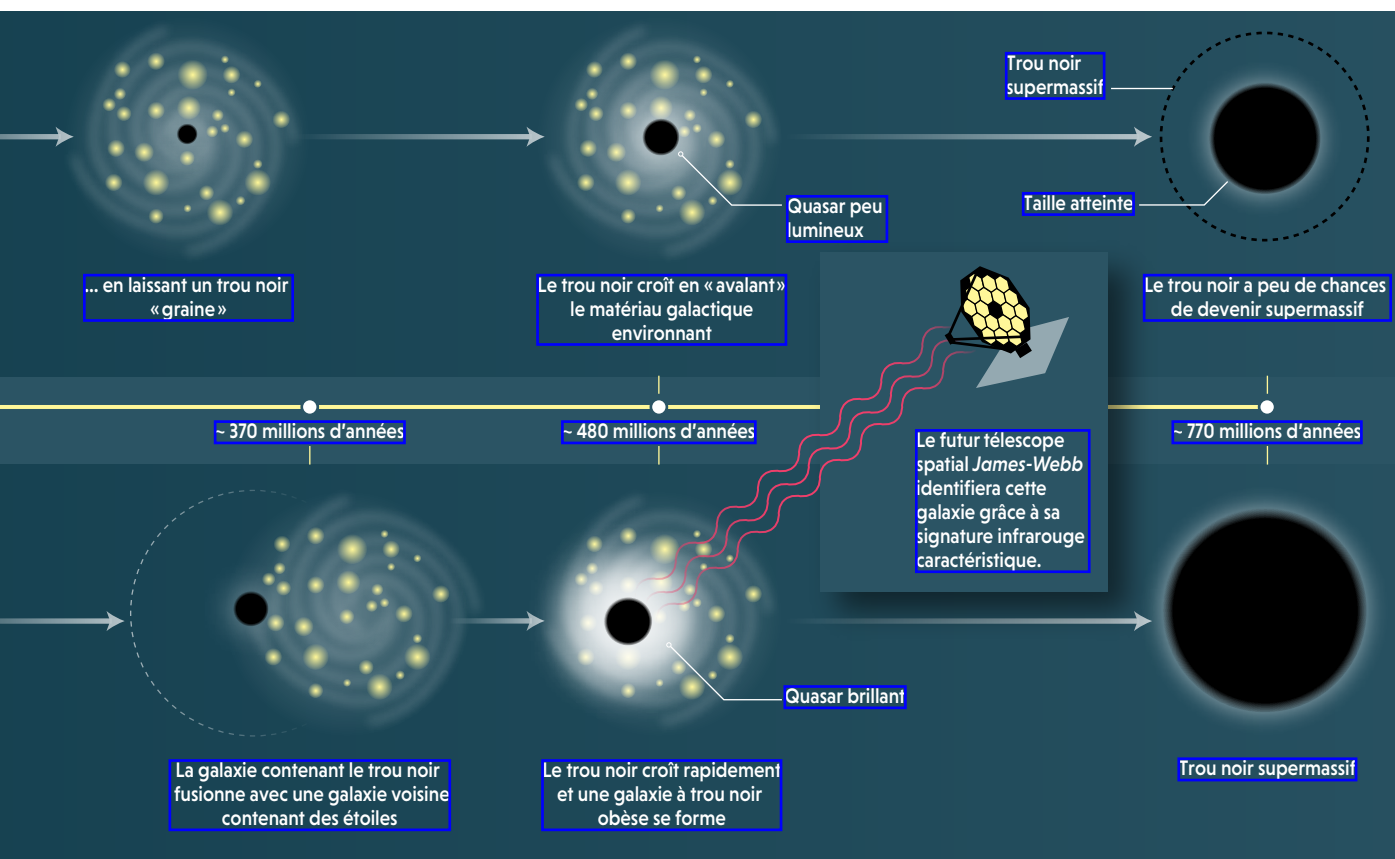
Ce télescope sera l'instrument le plus puissant que les astronomes auront jamais eu pour plonger leur regard dans la jeunesse de l'Univers. Si le télescope détecte des galaxies à trou noir obèse, ce serait un indice fort en faveur de

la théorie des trous noirs à effondrement direct. À l'inverse, les trous noirs graines, nés de la mort d'étoiles, seront bien trop pâles pour être visibles par le télescope *James-Webb*, ou n'importe quel autre.

D'autres types d'observations pourraient aussi fournir des indices en faveur de notre théorie. Dans les rares cas où la galaxie parent hébergerait un trou noir central, les deux trous noirs entreraient en collision en libérant d'importantes ondes gravitationnelles. Le futur interféromètre spatial *Lisa*, des agences spatiales européenne (l'ESA) et américaine (la Nasa), prévu pour les années 2030, devrait être en mesure de détecter un tel événement.

UN PORTRAIT PLUS PRÉCIS

Il est tout à fait possible que les scénarios des trous noirs à effondrement direct et les graines nourries à un rythme super-Eddington aient tous les deux coexisté dans l'Univers primordial. La question serait alors : lequel des deux a produit la majorité des quasars les plus anciens observés par les astronomes ? Résoudre cette énigme fera plus que préciser la chronologie de l'Univers jeune. Les astronomes auront aussi une meilleure compréhension de l'évolution des galaxies, car les trous noirs supermassifs y jouent un rôle important.



Les données suggèrent par exemple que le trou noir central influencerait sur la production d'étoiles de la galaxie où il se trouve. D'une part, la matière tombant dans le trou noir libère de l'énergie qui chauffe le gaz proche du centre galactique. Elle l'empêche ainsi de se refroidir et de former des étoiles. Cette influence serait aussi sensible à grande portée, bien au-delà du centre de la galaxie, sous la forme de jets de rayonnement de haute énergie. Ces jets, que les astronomes observent dans le domaine radio, chaufferaient le gaz des régions externes de la galaxie et y bloqueraient la formation stellaire. Ces effets sont complexes à modéliser, mais les astronomes espèrent mieux les comprendre: trouver les premières graines préciserait comment les relations entre ces trous noirs et leurs galaxies hôtes ont évolué au cours du temps.

Les perspectives de recherche présentées ici s'inscrivent dans une évolution importante de nos capacités à étudier et comprendre les trous noirs de toutes les tailles. Quand, par exemple, l'interféromètre *Ligo* a réalisé la première détection d'ondes gravitationnelles en 2015, les scientifiques ont pu déterminer que les deux trous noirs qui avaient fusionné pesaient respectivement 36 et 29 masses solaires, des cousins poids plumes des trous

noirs supermassifs au cœur des quasars. La poursuite des projets pour détecter d'autres ondes gravitationnelles permettra d'obtenir de nouveaux et fascinants détails sur ce qui se passe quand des trous noirs fusionnent et font vibrer l'espace-temps autour d'eux.

Par ailleurs, le télescope *Event Horizon* compte utiliser les observatoires radio disséminés partout à la surface de la Terre pour acquérir une image du trou noir au centre de la Voie lactée. Les chercheurs espèrent observer une « ombre » en forme d'anneau autour des bords du trou noir, un phénomène prédit par la relativité générale. Tout écart entre les mesures du télescope *Event Horizon* et les prévisions de la relativité générale serait un défi à notre compréhension des trous noirs. Enfin, des astrophysiciens veulent utiliser un réseau de pulsars, des étoiles émettant du rayonnement de façon régulière, pour détecter le bruit de fond cosmique des ondes gravitationnelles dû à l'accumulation de signaux émis par la coalescence de trous noirs dans l'Univers. Mais à plus court terme, c'est le télescope *James-Webb* qui ouvrira une nouvelle fenêtre sur la recherche des trous noirs dans l'Univers jeune.

De nombreuses découvertes sont à prévoir dans un futur proche. Et notre compréhension des trous noirs pourrait en être transformée. ■

BIBLIOGRAPHIE

P. Natarajan et al., **Unveiling the first black holes with JWST : Multi-wavelength spectral predictions**, *Astrophysical Journal*, vol. 838(2), article 117, 2017.

D. Psaltis et S. S. Doeleman, **Tester la relativité avec les trous noirs**, *Pour la Science*, n° 457, novembre 2015.

P. Natarajan, **Seeds to monsters : Tracing the growth of black holes in the Universe**, *General Relativity and Gravitation*, vol. 46(5), article 1702, 2014.

E. Treister et al., **New observational constraints on the growth of the first supermassive black holes**, *Astrophysical Journal*, vol. 778(2), article 130, 2013.

LES AUTEURS



JONAS BERKING
géographe à
l'université libre
de Berlin,
en Allemagne



BRIGITTA SCHÜTT
géographe à
l'université libre
de Berlin



WIEBKE BEBERMEIER
géographe à
l'université libre
de Berlin



STEPHAN SCHMID
archéologue à
l'université
Humboldt, à Berlin



Cette citerne, construite dans le désert du Néguev, à Bom Havarim, en Israël, illustre le savoir-faire hydraulique des Nabatéens, dont les cités ont prospéré malgré les conditions arides.

L'ESSENTIEL

> Les anciennes populations des régions arides ont dû optimiser leur gestion de l'eau.

> Les archéologues étudient leurs anciens systèmes de captage et de distribution, dont certains sont encore en usage.

> Le savoir-faire associé constitue un important patrimoine culturel, qu'il importe de sauvegarder pour le rendre utile à l'avenir.

> La négligence et l'oubli menacent ces installations traditionnelles.

Le vieux génie des eaux du désert

Les populations du passé savaient gérer avec efficacité les maigres ressources en eau des régions arides. Parfois encore en usage, leurs techniques pourraient servir de modèles à une exploitation durable du précieux liquide.

En 2018, un Européen qui veut boire n'a aucun problème: il ouvre l'un des robinets de son logement et obtient aussitôt de l'eau de bonne qualité et autant qu'il en souhaite. C'est loin d'être le cas dans de nombreuses régions du monde. Selon le Rapport mondial sur l'eau de l'Unesco publié en 2014, environ 15% de nos contemporains n'ont pas accès à l'eau potable et 1,8 million d'entre eux meurent chaque année de maladies dues à la pollution de l'eau.

Ce problème se pose particulièrement dans les régions arides et semi-arides, soit environ un tiers des terres émergées. Le fait que ces régions soient aussi les plus anciennes zones de peuplement (voir la carte page 47) est étonnant, sachant à quel point la pluie y tombe irrégulièrement: l'eau n'y est disponible en quantité suffisante que quelques jours ou quelques semaines par an... Dès lors, se demande-t-on, comment les cultures anciennes ont-elles réussi à se procurer cet élément vital?

Disposer de suffisamment d'eau ne dépend pas que de la pluviométrie: la question est plutôt celle de l'exploitation des précipitations. Une grande partie des eaux de pluie qui circulent dans un bassin-versant ne peut pas être exploitée: elle s'évapore rapidement ou s'infiltre jusqu'à des nappes phréatiques profondes. Quant à l'eau aisément accessible, elle est souvent de mauvaise qualité, par exemple parce qu'elle est salée ou saumâtre. L'eau souterraine des zones arides est en outre souvent fossile, de sorte qu'elle ne se renouvelle pas.

La quantité d'eau exploitable dans une région sèche dépend en grande partie des connaissances disponibles sur l'occurrence, la collecte, le stockage et la distribution de la ressource aqueuse. La compétence des usagers et des ingénieurs hydrauliciens qui la gèrent joue donc un rôle essentiel.

A cet égard, les systèmes hydrauliques développés par les populations anciennes sont fascinants. Ils constituent d'ailleurs souvent l'une des bases de la gestion actuelle et locale des eaux. Pour autant, les systèmes d'irrigation



© Getty Images/DEA / archi / Jo J. Lange / Contributeur

des anciens ne sont aujourd'hui que très partiellement conservés. Les techniques qui permettent de les faire fonctionner représentent un patrimoine culturel important et font partie de l'identité des populations locales. Et elles peuvent nous montrer comment utiliser de façon durable une ressource. Pour toutes ces raisons, il importe de les documenter et de préserver leur utilisation.

QUAND LA PLUIE NE TOMBE QUE QUELQUES JOURS PAR AN

Plusieurs exemples à travers le monde illustrent cela. Commençons notre voyage avec la ville nabatéenne de Pétra, en Jordanie. Les raisons pour lesquelles cette ville a été fondée dans la vallée chaude et aride de l'oued Moussa sont débattues depuis longtemps. Cet oued n'étant en eau que quelques jours par an, les avantages stratégiques ou économiques du site étaient-ils si grands qu'ils compensaient le manque d'eau? En réalité, le site de Pétra recèle de l'eau, mais encore fallait-il savoir comment se la procurer.

Cette ville à l'impressionnante architecture troglodyte a été construite dans une étroite bande montagneuse située entre la vallée chaude et très sèche de l'Arabah, à l'ouest, et les vastes déserts du plateau jordanien, à l'est. Ce paysage de pentes rocheuses et de vallées étroites, donc faciles à défendre, fournit aussi assez d'espace pour y aménager de grandes rues et des places. Outre sa remarquable architecture, la splendeur passée de Pétra était peut-être aussi liée à sa richesse en eau. Il y a deux mille ans, en effet, alors que la ville était au faite de sa prospérité, des fontaines et des jeux d'eau bordaient sa rue principale. Cette ville du désert où clapotis et autres bruits d'eau résonnaient dans les jardins et les bassins de stockage a dû offrir un spectacle magnifique. Les visiteurs de l'Antiquité qui, comme le décrit le géographe Strabon au

tournant de notre ère, y parvenaient après des semaines de voyage à travers des paysages arides et secs, devaient en être profondément impressionnés.

Mais d'où provenait cette eau? Les études paléoclimatiques indiquent qu'il y a deux mille ans, le climat de Pétra était le même que celui d'aujourd'hui: sec presque toute l'année. De fait, pas plus de 100 à 200 millimètres de pluie tombent annuellement. Au contraire de ce qui est le cas ailleurs, cette eau ne ruisselle pas sur un sol sec et desséché, mais surtout sur des roches nues. Ne pouvant s'infiltrer, la partie qui ne s'évapore pas s'écoule sous la forme de torrents qui peuvent être dévastateurs. Une partie de ces pluies peut cependant s'infiltrer et remplir des réservoirs souterrains, qui sont à l'origine de plusieurs dizaines de sources permanentes en amont de Pétra.

Les Nabatéens profitaient à la fois du ruissellement et des infiltrations des eaux. Grâce à un ingénieux système de plus de 20 kilomètres de canalisations, ils captaient toutes les sources souterraines se trouvant dans un rayon de dix kilomètres. Ce système comportait probablement cinq aqueducs principaux, dont certains prenaient la forme de conduites en terre cuite sous pression. Par ailleurs, l'eau ruisselant à la surface de la roche était recueillie à l'aide de canaux creusés dans la pierre en de nombreux endroits. Grâce à ces techniques, les Nabatéens ont réussi à rendre Pétra prospère, puis à la faire vivre durant plusieurs siècles. Sans elles, les pluies torrentielles de printemps sur le grès nu de la région auraient régulièrement dévasté la ville.

Il y avait cependant un problème: au cours de son long chemin vers les canaux, l'eau recueillie se pollue et devenait impropre à la consommation. Les hydrauliciens nabatéens ont donc développé une solution ingénieuse: un complexe de bassins de sédimentation et de



Vue sur le bassin de la vallée de Pétra. La ligne en arrière-plan signale l'aquifère qui s'est formé dans les monts Shar'a. Les Nabatéens y avaient capté les eaux d'une demi-douzaine de sources et construit des aqueducs pour les acheminer jusqu'à Pétra, où elles alimentaient de spectaculaires plans d'eau. Le X marque l'emplacement d'un ancien jardin comportant piscine et île artificielle. Les flèches indiquent le cheminement des oueds par lesquels les eaux de pluies tombées sur les montagnes traversent la vallée de Pétra. Les Nabatéens les collectaient puis les acheminaient vers la ville de façon organisée.

citernes successives, sorte de station d'épuration où les particules solides sédimentaient dans les bassins, tandis que les bactéries mouraient dans l'obscurité des citernes.

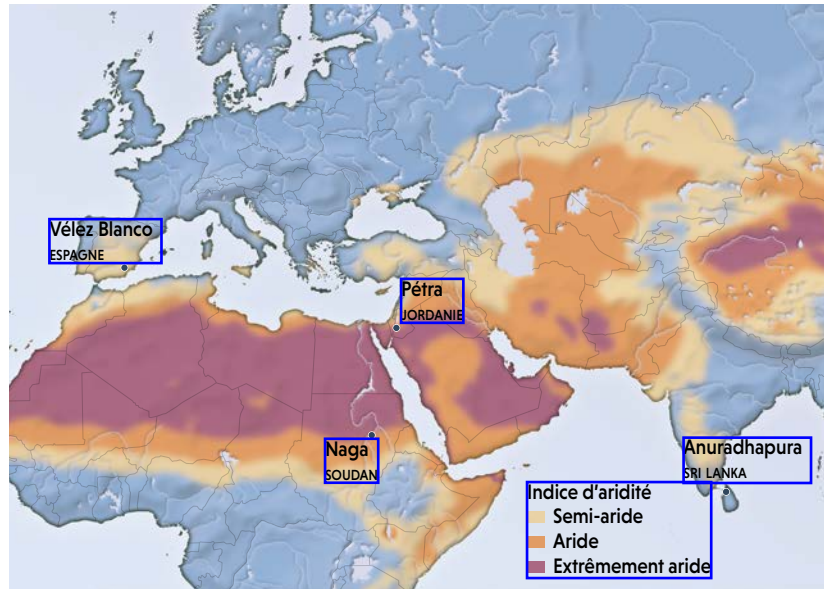
Vers le milieu du 1^{er} millénaire avant notre ère, pendant que les Nabatéens s'installaient à Pétra, le royaume de Méroé s'épanouissait sur le cours moyen du Nil (dans le Soudan actuel). Des millénaires durant, le Nil et ses crues fertilisantes annuelles avaient fourni un refuge aux populations du désert. Mais, contrairement aux Égyptiens, les Méroïtes ont choisi de construire aussi des villes à distance du Nil. Ils devaient donc les approvisionner en eau sans pouvoir puiser dans le fleuve.

MÉROÉ, ROYAUME DU DÉSERT

L'une de ces villes, Naga, est aujourd'hui une ruine couverte de sable. La fouille de ses structures architecturales nous a principalement renseignés sur ses sanctuaires et ses palais. Pour autant, comment s'y approvisionnait-on en eau? Le site de Naga se trouve aujourd'hui dans une savane aride et sèche où, comme à Pétra, la pluviométrie annuelle n'est que d'environ 100 millimètres. L'eau de pluie n'y coule que quelques jours par an dans les oueds où se stocke au sein de réservoirs souterrains profonds, entre 70 et 90 mètres sous la surface, tandis que le Nil est à plus de 40 kilomètres...

Lors de la fondation de la ville, les conditions régnant dans la région étaient plus humides qu'aujourd'hui : grâce aux pluies, l'eau était probablement disponible pendant plusieurs mois par an. Puis le climat s'est lentement asséché jusqu'à l'installation des conditions actuelles au début de notre ère. Les habitants de Naga ont donc dû trouver une solution.

Deux circonstances ont joué en leur faveur : d'une part, la pluie tombe dans la région de Naga presque toujours entre juin et août ; d'autre part, la dépression équatoriale qui est chaque année à l'origine de la saison des pluies



Cette carte de l'indice d'aridité (on calcule cet indice caractéristique d'une zone en fonction de ses niveaux de précipitation et d'évaporation) révèle que de vastes régions de l'Afrique et de l'Eurasie sont arides, voire ultra-arides – comme, du reste, un tiers des terres émergées.

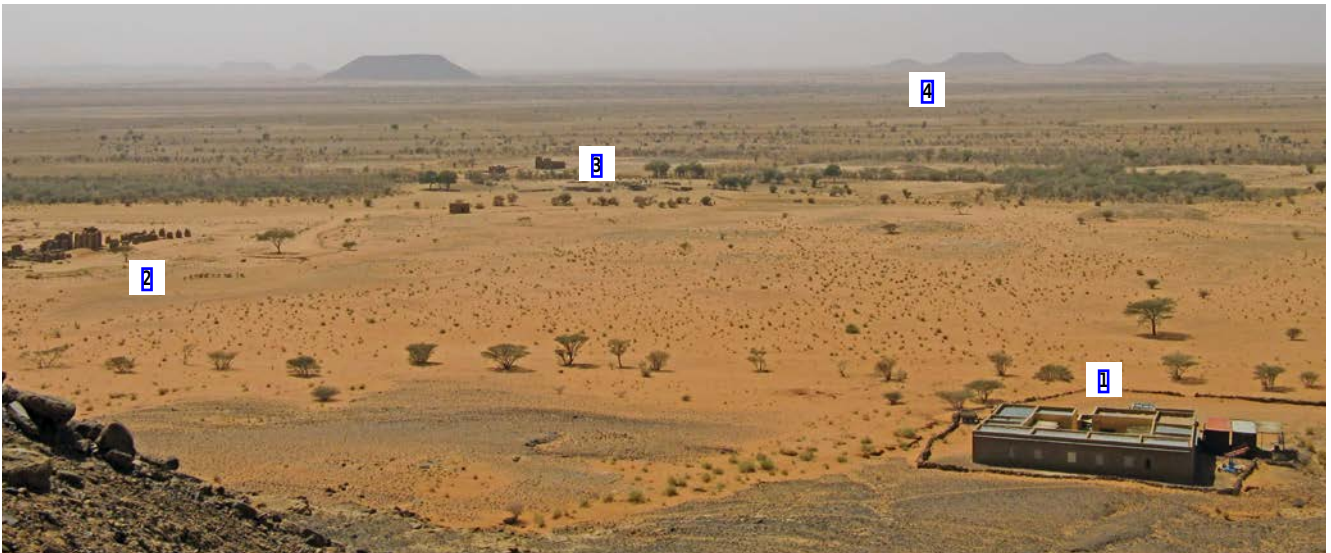
sous les tropiques atteint à Naga sa latitude la plus septentrionale. Les pluies tropicales qui en résultent sont intenses. Un bref ruissellement de surface se forme, puis s'écoule en torrents à travers les oueds.

Pour exploiter cette eau, les habitants de Naga ont construit, partout sur le cheminement de l'eau, des bassins de captage : les *hafirs*. Ces petits bassins creusés à la main au fond des vallées sédimentaires descendent souvent jusqu'au substrat rocheux. Leurs bords sont constitués des matériaux qui en ont été excavés. D'un diamètre de 170 mètres, le grand *hafir* de Naga est bordé par un mur de 4,5 mètres de haut et d'une profondeur atteignant 10 mètres à certains endroits. Il fut probablement construit à proximité immédiate de Naga, à l'apogée de la cité. Sa capacité d'environ 37 000 mètres cubes correspond au volume d'une bonne quinzaine de piscines olympiques. On connaît des installations méroïtiques similaires, par exemple dans les villes de Basa et de Musawwarat es-Sufra.

Les *hafirs* ont la particularité d'être toujours utilisés aujourd'hui, voire parfois créés par les habitants actuels des environs des anciennes villes méroïtiques. Ainsi, le savoir-faire correspondant est toujours présent. Afin de faire face à la rareté croissante de l'eau, l'État soudanais encourage depuis les années 1980 la construction de *hafirs*. Au Soudan, la réactivation de techniques millénaires offre ainsi une possibilité d'exploitation plus durable des ressources en eau.

Les systèmes de collecte d'eau des Nabatéens et des Méroïtes témoignent d'un savoir-faire technique très développé, mais ils

La capacité du grand hafir de Naga (un bassin de captage) est d'environ 15 piscines olympiques



Au tournant de notre ère, la ville de Naga, dans le royaume de Méroé (dans l'actuel Soudan), s'est épanouie dans une vallée tributaire du Nil. La base des archéologues est située au pied d'un plateau de pierre (1). À gauche

de l'image, on voit les restes du temple d'Amon (2) et au milieu, les ruines du temple du Lion (3). L'oued Awatib mesure jusqu'à 3 kilomètres de large et contient d'innombrables petites rigoles bordées d'acacias (4).

impliquent certainement beaucoup d'entretien et de maintenance. Naga et Pétra ont toutes les deux été abandonnées vers le milieu du I^{er} millénaire de notre ère. L'empire romain, sans doute la culture que la conscience collective associe le plus à l'idée de gestion de l'eau, disparaît aussi à cette époque. À son apogée, il jouxtait les royaumes nabatéens et méroïtiques; la question de l'influence du savoir-faire hydraulique des Romains sur ceux des Nabatéens et des Méroïtes s'est donc posée, sans qu'une réponse faisant l'unanimité se dégage.

LES « WEWAS » DU SRI LANKA

En revanche, les Romains n'ont sûrement pas eu d'influence sur les systèmes d'irrigation complexes qui ont été mis au point loin en Asie. Quelque trois cents ans avant Pétra et Méroé, le Sri Lanka a ainsi commencé à développer une gestion élaborée de l'eau qui joue toujours un rôle important aujourd'hui, notamment en agriculture. Son principe était de stocker dans des réservoirs les pluies et les eaux de ruissellement qu'elles produisaient. En fonction des besoins des champs, de l'eau était tirée pendant les mois secs de l'été de ces réservoirs, qui avaient aussi l'intérêt de servir de bassins de rétention lors des inondations de la mousson.

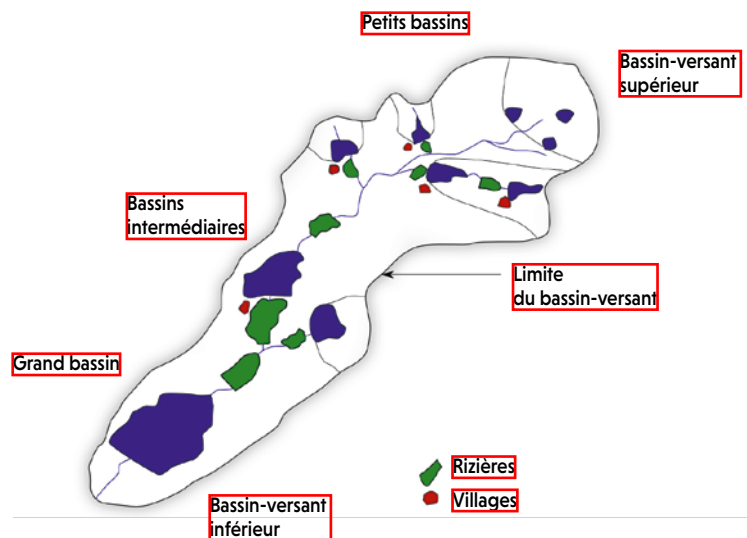
Appelés *wewas*, les innombrables bassins qui constituaient ce système de captation ont été construits le long de la plus grande pente des vallées plates et reliés par un système de canaux et d'écluses. Vers l'aval, la taille des réservoirs augmentait. D'une superficie de quelques hectares dans la partie supérieure du système, les petits bassins servaient souvent de bassins de sédimentation et d'abreuvoirs pour les animaux sauvages qu'ils maintenaient

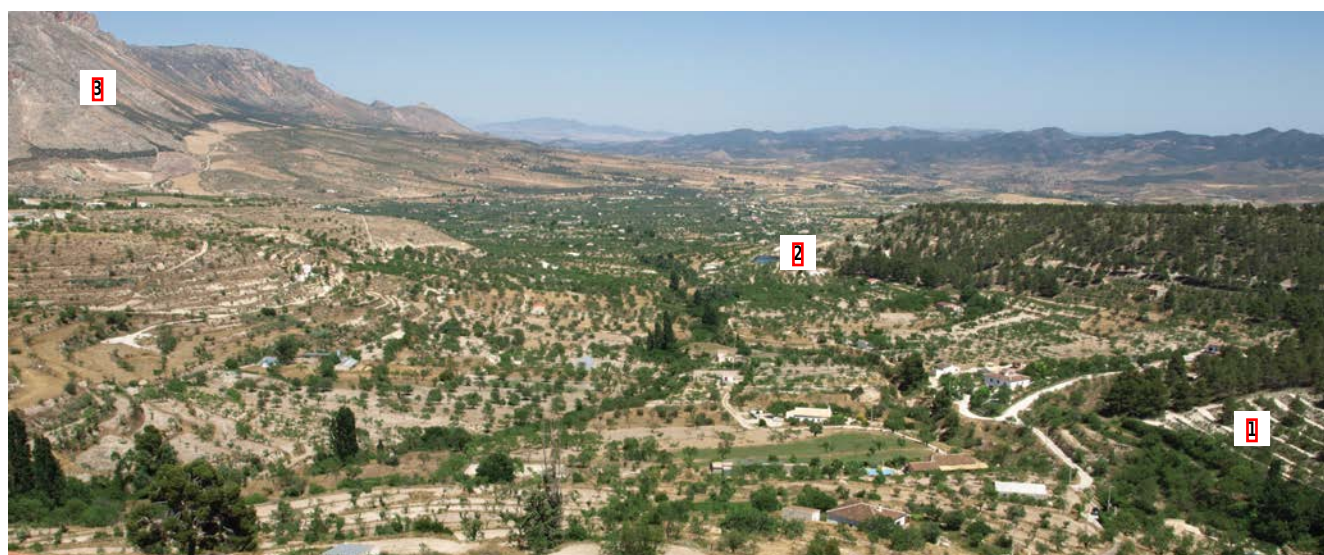
ainsi loin des villages. Plus bas dans le réseau, les bassins avaient des superficies qui atteignaient parfois 200 hectares.

C'est grâce à ces réservoirs en cascade que la ville d'Anuradhapura a pu devenir la capitale d'un royaume portant son nom (de 377 avant notre ère à 1017). Seule la maîtrise d'une bonne technique d'irrigation a permis de cultiver du riz aquatique (le « riz irrigué ») dans les conditions climatiques du Sri Lanka, où sévissait notamment une sécheresse saisonnière prononcée. Or cette culture a joué un rôle essentiel dans l'approvisionnement des populations croissantes des villes du royaume.

Lors de la fondation de la capitale royale Anuradhapura, de grands bassins de stockage ont été construits à sa proximité immédiate. Des inscriptions et les premières chroniques

Il y a plus de deux mille ans, les habitants du Sri Lanka ont développé un système de captage et de régulation de l'eau à base de bassins reliés par des canaux. Les tailles des bassins augmentent depuis l'amont vers l'aval. Chaque village installait sa rizière directement sous un réservoir. Le nombre de bassins varie de 3 à 30 au sein d'un même réseau.





Vélez Blanco, en Andalousie, est un village agricole, où se pratique depuis mille ans un système de partage de l'eau introduit par les Maures. Les terrasses cultivées (1) reçoivent de l'eau par l'intermédiaire d'un vieux réseau de canaux,

qui aboutit aujourd'hui dans un réservoir moderne (2). La colline Muela (3) est à l'origine des sources qui alimentent ce réseau, mais leurs étiages baissent depuis que les forages se multiplient dans la région.

historiques donnent un aperçu de l'organisation de la gestion de ces réservoirs. Contrairement aux cascades de réservoirs des zones rurales, créées et gérées par la population paysanne, les grands bassins étaient gérés par l'administration royale, donc de façon centralisée. Puisqu'ils ne s'asséchaient généralement pas, même si les saisons des pluies du printemps et de l'automne apportaient peu d'eau, ils atténuaient les effets d'un déficit saisonnier en eau.

Aujourd'hui, environ 30 000 bassins sont en usage au Sri Lanka dans une région dont la taille est comparable à celle de l'Occitanie. On investit toujours afin de réaliser de nouveaux réservoirs, de sorte que les réseaux de bassins constituent l'une des composantes importantes du paysage et de la culture de ce pays.

MILLE ANS DE GESTION CONSENSUELLE D'UNE « VEGA »

En Europe aussi existent des terroirs où l'on continue à utiliser les techniques d'irrigation de l'Antiquité ou du Moyen Âge. L'un d'eux est Vélez Blanco, en Andalousie, dans le sud-est de la péninsule Ibérique. Des Romains d'abord, puis des Goths, des Maures et enfin des Espagnols y ont vécu. Le village et son paysage attendant de jardins (des *vegas*) offrent aux chercheurs une occasion unique d'étudier comment un système d'irrigation a pu à la fois fonctionner pendant des siècles tout en s'adaptant aux conditions sociales et techniques changeantes.

La vega de Vélez Blanco est une zone de champs en terrasses dont l'irrigation est gérée en commun par leurs propriétaires, tous des habitants de la commune. Plus de 100 kilomètres de canaux reliés à plusieurs

BIBLIOGRAPHIE

J. Berking et al., **Heavy rainfalls in a desert(ed) city : A climate-archaeological case study from Sudan**, dans L. Giosan et al., *Climates, Landscapes, and Civilizations*, American Geophysical Union, pp. 163-168, 2013.

D. L. O. Mendis, **Environment and conflict : A kuhnian paradigm-based approach to understanding some socio-cultural and economic causes of problems and conflicts in modern irrigation projects in Southern Sri Lanka**, dans *Water for People and Nature*, Ministry of Irrigation and Water Management (dir.), Sri Lanka Water Heritage, pp. 95-122, 2003.

sources souterraines distribuent gratuitement de l'eau dans les champs d'après une rotation complexe et proportionnelle à la surface à irriguer. L'eau provient de sources qui surgissent au pied du mont Maimón, et c'est leur permanence qui explique la fondation du village. Outre cet approvisionnement de base, les agriculteurs disposent aussi de la possibilité d'acheter un volume d'eau supplémentaire aux enchères. C'est surtout au printemps, pour les semailles, ou pendant les mois d'été chauds et secs que la demande augmente et que les prix montent. Le produit des ventes aux enchères de l'eau sert à l'entretien et à la rénovation du réseau de canaux, ce qui rend le système pratiquement autonome.

D'origine mauresque, cette façon de gérer l'eau est pratiquée à Vélez Blanco depuis plus de mille ans. Toutefois, comme en beaucoup d'endroits en Espagne, ce système traditionnel pourrait s'effondrer. Une première raison est liée à l'exode rural : depuis le xx^e siècle, Vélez Blanco a perdu 75 % de sa population. Ce sont surtout les jeunes qui partent... Ensuite, la multiplication dans le sud de l'Espagne de forages équipés de pompes électriques, la plupart illégaux, fait baisser la nappe phréatique et assèche les sources.

Ces problèmes espagnols sont à l'image de ceux du monde : l'eau, surtout dans les régions arides, est une ressource rare, comme l'est aussi la prudence dans sa gestion ! Les quatre exemples que nous avons présentés prouvent que dans le passé, les populations humaines ont été capables de se procurer de l'eau même dans des conditions difficiles. Leur exemple devrait nous aider à mieux utiliser cette ressource précieuse et de plus en plus rare. ■

L'ESSENTIEL

> Les mollusques construisent des coquilles de formes complexes avec une précision mathématique.

> La modélisation mathématique montre qu'il suffit de suivre trois règles simples pour reproduire ces formes.

> Ces résultats aident à comprendre pourquoi de nombreuses espèces de mollusques non apparentées sécrètent des coquilles aux formes similaires.

LES AUTEURS



DEREK E. MOULTON
professeur de
biomathématiques à
l'université
d'Oxford,
en Grande-Bretagne



ALAIN GORIELY
professeur
de modélisation
mathématique
à l'université
d'Oxford



RÉGIS CHIRAT
paléontologue et maître
de conférences
à l'université
Claude-Bernard, à Lyon

Comment les coquillages acquièrent leur forme

Spirales, épines, surfaces côtelées... : les coquilles des mollusques ont des géométries complexes et d'une étonnante régularité. Comment ces formes sont-elles produites ? La modélisation mathématique montre que quelques processus mécaniques simples suffisent à engendrer les caractères observés.



Vue aux rayons X d'un peigne
de Vénus (*Murex pecten*),
gastéropode marin de la famille
des Muricidés.

Les mollusques sont de fantasmatiques architectes. Ils se construisent des structures solides qui protègent leur corps mou des prédateurs et des éléments: les coquilles, qui sont d'une robustesse, d'une durabilité et d'une beauté hors du commun. Beaucoup de ces coquillages présentent des formes complexes et spectaculaires, des spirales logarithmiques garnies d'épines bien ordonnées ou d'autres ornements, d'une régularité mathématique presque parfaite. Les mollusques n'ont pourtant aucune notion en mathématiques, évidemment. Les chercheurs se sont donc demandé comment ces humbles créatures produisent des motifs aussi complexes avec une telle précision.

Depuis plus d'un siècle, les scientifiques savent que les cellules, les tissus et les organes doivent obéir aux mêmes forces physiques que le reste de la matière. Mais pendant une bonne partie du xx^e siècle, les biologistes se sont attachés à comprendre comment le code génétique régit la formation de motifs biologiques et à déterminer comment ces motifs fonctionnent. Au cours des dernières décennies, cependant, les chercheurs se sont mis à appliquer la modélisation mathématique, appuyée sur la physique, pour tenter de comprendre comment apparaissent les formes du vivant. Dans cette optique, nos propres travaux ont livré ces dernières années des indices passionnants sur la façon dont les coquillages acquièrent des structures si remarquables.

En utilisant les outils de la géométrie différentielle, la partie des mathématiques qui étudie les courbes et les surfaces, nous avons déterminé que les formes complexes des coquillages découlent de quelques règles simples que suivent les mollusques lorsqu'ils bâtissent leur demeure. Ces règles interagissent avec les forces mécaniques produites au cours de la croissance du coquillage et engendrent une grande diversité de motifs. Nos découvertes contribuent à expliquer comment des caractéristiques singulières telles que les épines sont apparues de façon indépendante dans tant de lignées de gastéropodes (le groupe de mollusques le plus diversifié). Ces organismes n'ont nul besoin de subir les mêmes modifications génétiques pour acquérir le même type d'ornements, car les lois de la physique font l'essentiel du travail.

C'est au manteau du mollusque qu'il incombe de construire la coquille. Cet organe fin et mou sécrète couche après couche une substance riche en carbonate de calcium au niveau de l'ouverture du coquillage. Il lui suffit de suivre trois règles élémentaires pour former la spirale caractéristique des coquilles d'escargots, par exemple, et de nombreuses autres espèces de mollusques.

La première règle est l'*expansion*: en déposant uniformément davantage de matériau qu'à

l'incrément de croissance précédent, le mollusque crée une ouverture un peu plus large à chaque itération. Ce processus engendre un cône à partir d'un cercle initial. La deuxième règle est la *rotation*: en déposant légèrement plus de matériau d'un côté de l'ouverture, le mollusque finit par opérer une rotation complète de cette ouverture, ce qui construit un tore (la forme d'une chambre à air de pneu) à partir d'un cercle initial. La troisième règle est la *torsion*: le mollusque fait tourner les points où a lieu le dépôt. Si l'on n'effectue que les opérations *expansion* et *rotation*, on obtient un coquillage planispiralé comme celui des nautilus. Ajoutez la torsion, et le résultat est ce qu'on appelle une coquille hélicospirale comme celle des escargots.

Pour certains bâtisseurs de coquille, c'est la fin de l'histoire, une demeure toute en élégance et en simplicité. Pour d'autres, quelques fioritures sont de mise. Pour comprendre comment se forment des ornements tels que les épines, il nous faut examiner les forces produites au cours de la croissance du coquillage.

Le processus de sécrétion du coquillage repose sur un système mécanique intéressant. Le manteau est attaché à la coquille par ce qu'on

L'application de trois règles élémentaires suffit pour reproduire les spirales observées

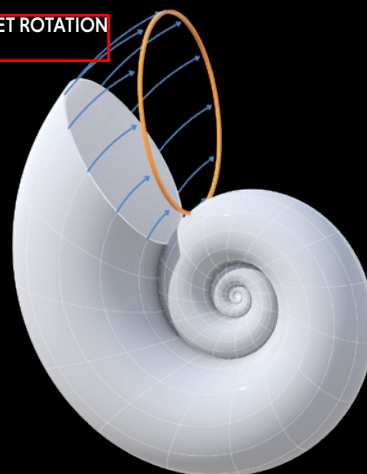
nomme la zone générative, une région de matériau sécrété mais pas encore calcifié. C'est dans cette interaction entre le manteau et la coquille que réside le potentiel de formation de motifs. Tout décalage entre le manteau et l'ouverture de la coquille va imposer une contrainte mécanique au tissu du manteau. Si le manteau est trop petit pour l'ouverture, il devra s'étirer pour y rester attaché. Si le manteau est trop grand, il devra se comprimer. Et si la zone générative se déforme à cause de ces contraintes, le nouveau matériau sécrété par le manteau à ce stade adoptera la déformation du contour et se solidifiera, ce qui exercera une influence accrue sur le manteau à l'incrément de croissance suivant.

Pour résumer, si la coquille ne croît pas exactement au même rythme que le manteau

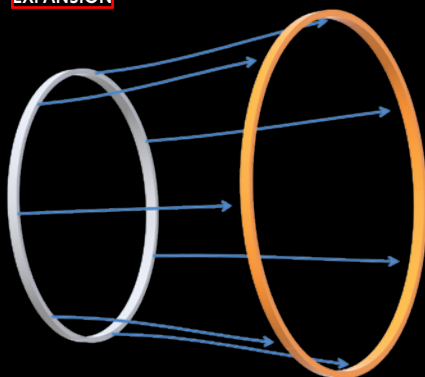
Des spirales

Les spirales des coquilles de mollusques s'obtiennent en suivant trois règles simples. La première est l'*expansion* : à mesure que le mollusque sécrète ses couches successives de matériau pour construire la coquille, il dépose de façon uniforme davantage de matériau à chaque incrément de croissance et crée ainsi une ouverture de plus en plus large. La deuxième règle est la *rotation* : en déposant légèrement plus de matériau sur un côté de l'ouverture, le plan de celle-ci tourne et une forme torique se constitue. La troisième règle est la *torsion* : les points où se dépose le matériau tournent le long du contour. Les diverses combinaisons de ces règles de base produisent les différentes formes spiralées.

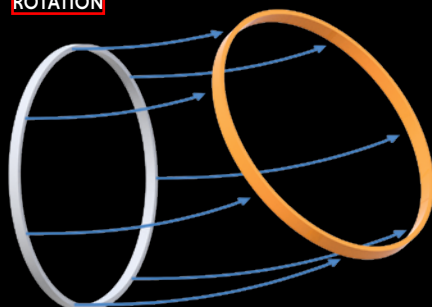
EXPANSION ET ROTATION
Nautilus



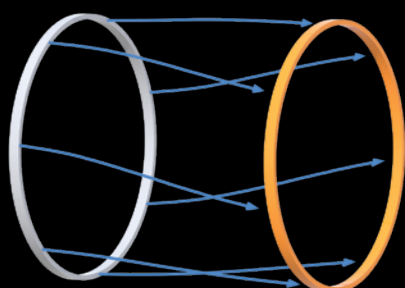
EXPANSION



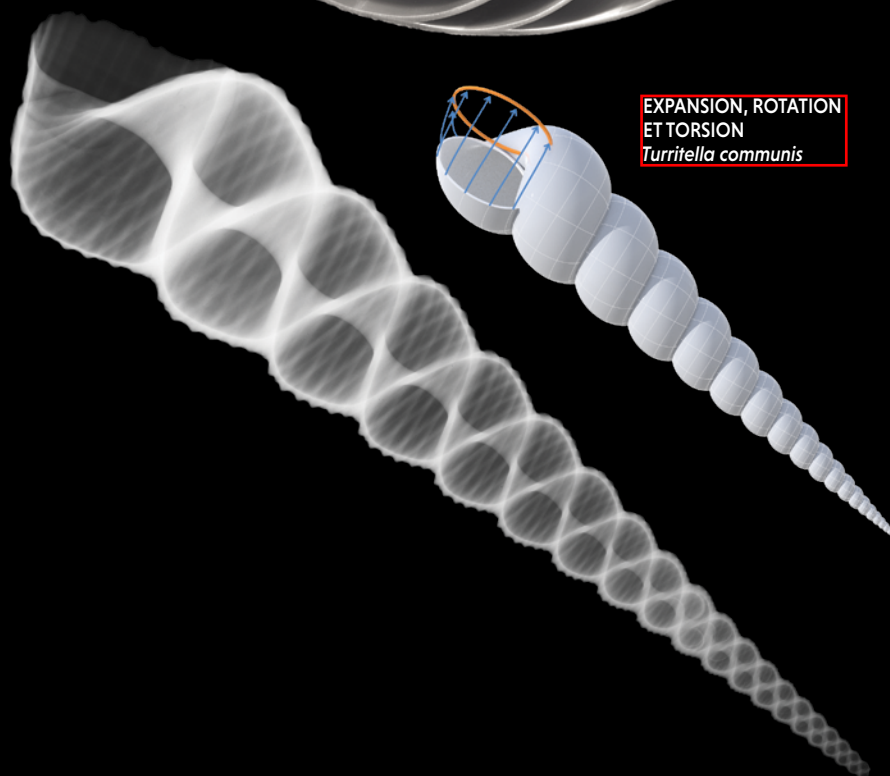
ROTATION



TORSION



EXPANSION, ROTATION
ET TORSION
Turritella communis

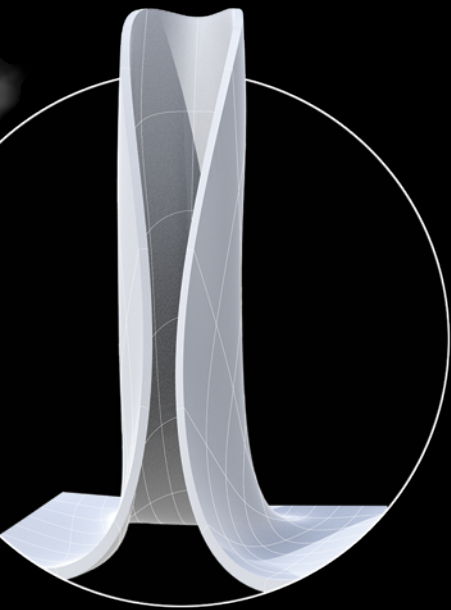


Des épines

Chez un mollusque, l'organe nommé manteau sécrète la substance qui constituera la coquille. Les épines se forment lors de phases d'accrétion, quand le manteau s'agrandit à une telle vitesse qu'il ne peut plus s'aligner avec l'incrément de croissance précédent de la coquille. Ce décalage entraîne une légère déformation du manteau. Le matériau qui est sécrété pour la construction de la coquille produit alors une forme bombée. À chaque incrément de croissance, le conflit mécanique augmente et la déformation s'amplifie. Une épine se constitue ainsi.

Murex endive
(*Hexaplex cichoreum*)





Le manteau est lié à la coquille au niveau de la zone générative, région où du matériau est sécrété, mais n'est pas encore durci. La déformation du manteau entraîne une déformation de la zone générative, qui est communiquée à la couche suivante de coquille. Le motif est amplifié à chaque incrément de croissance.

Bord de la coquille

Bord du manteau

Bord du manteau

Zone générative

Accrétion au fil du temps

La forme de l'épine dépend principalement du taux de croissance du manteau au moment de la phase d'accrétion et de la rigidité du manteau.

Moins rigide

Plus rigide

Bas

Élevé

Taux de croissance

du mollusque, des déformations apparaissent, ce qui engendre des caractéristiques que nous identifions comme des ornements.

Les épines constituent le type d'ornementation le plus marqué. Elles pointent généralement à angle droit par rapport à l'ouverture du coquillage et s'étendent souvent jusqu'à plusieurs centimètres au-delà de la surface de la coquille. Ces projections se forment à intervalles réguliers, correspondant aux poussées de croissance du manteau. Lors d'une poussée de croissance, le manteau se développe si vite qu'il acquiert un périmètre supérieur à celui de l'ouverture de la coquille. Ce décalage entraîne un léger bombement du manteau. Le matériau qu'il sécrète prend alors la forme d'une petite bosse. À l'étape suivante, le manteau s'est encore agrandi et est de nouveau trop large par rapport à l'ouverture, ce qui a pour effet d'amplifier le pli initial. Nous avons fait le raisonnement que ce processus répété de croissance et d'interaction mécanique engendre une rangée d'épines, dont le motif précis est principalement déterminé par le taux de croissance lors de la poussée et par la rigidité du manteau.

Afin de tester cette idée, nous avons développé un modèle mathématique de manteau qui

croît sur un contour qui se modifie à chaque incrément de croissance. En effectuant des essais de notre modèle avec les taux de croissance et les propriétés du matériau mesurés sur les mollusques, on observe l'émergence de toute une gamme de formes d'épines, similaires à celles observées sur les coquillages réels. Notre hypothèse en sort donc confortée.

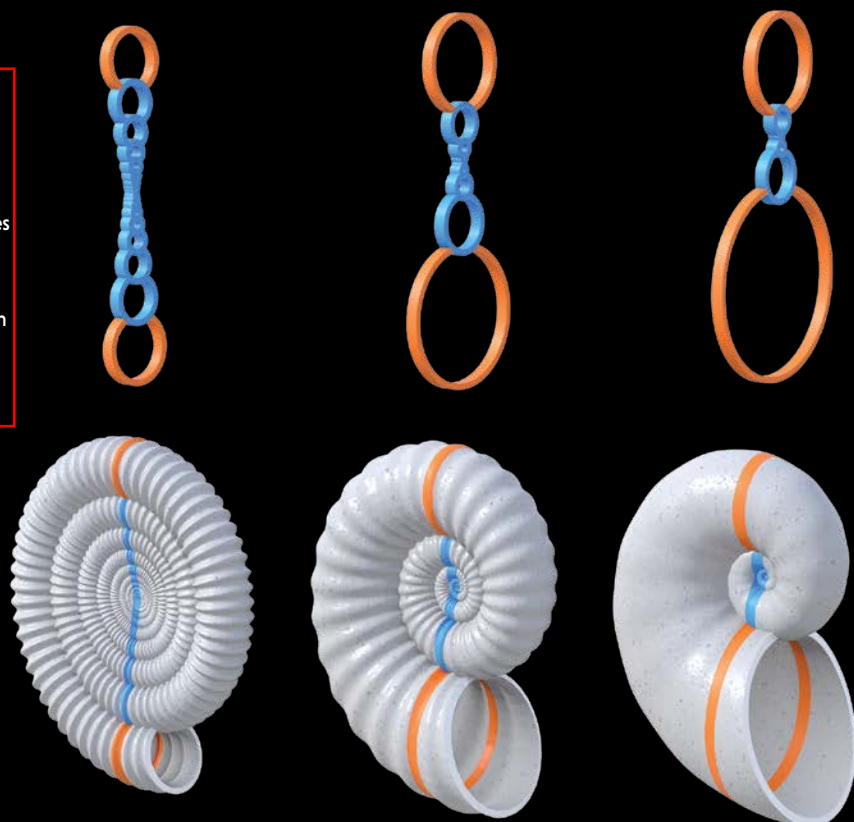
COQUILLES CÔTELÉES

Les épines ne sont pas le seul ornement possible des coquilles des mollusques. Un autre type de motif est présent sur les coquilles des ammonites, groupe de mollusques céphalopodes aujourd'hui disparu et apparenté aux actuels nautilus, poulpes et leurs cousins. Les ammonites ont dominé dans les mers pendant 335 millions d'années avant de disparaître il y a environ 65 millions d'années. L'abondance de leurs fossiles, ainsi que la grande diversité de leurs formes et leur taux d'évolution élevé en ont fait le groupe d'invertébrés fossiles le plus étudié.

La caractéristique la plus frappante d'une coquille d'ammonite, au-delà de sa forme de spirale logarithmique plane, est son caractère côtelé: la spirale présente des côtes qui se succèdent régulièrement. Cette ornementation

Des côtes

Les coquilles des ammonites, un groupe de mollusques éteint, présentent des côtes régulières qui se forment parallèlement au bord du coquillage. Les modélisations mathématiques indiquent que ce motif d'ornementation est le produit de forces opposées exercées par le manteau et la zone générative, qui forment un système oscillatoire de tension et de compression. Une lente expansion de l'ouverture du mollusque conduit à des côtes denses (à gauche), tandis qu'une expansion rapide conduit à des coquilles lisses (à droite).



découle sans doute du même conflit mécanique qui produit les épines, mais le motif est complètement différent. Les forces sont les mêmes, mais s'exercent avec des amplitudes différentes, et sur une géométrie différente.

L'ouverture de l'ammonite est circulaire chez de nombreuses espèces. Si le rayon du manteau est supérieur au rayon de l'ouverture actuelle, le manteau sera comprimé, mais pas assez pour engendrer le degré d'instabilité élastique nécessaire pour produire les épines. Au lieu de cela, le manteau pousse vers l'extérieur, et le rayon de la coquille augmente lors de l'incrément de croissance suivant. Mais ce mouvement vers l'extérieur est contrecarré par la zone générative, qui agit comme un ressort antagoniste ayant tendance à maintenir l'orientation de la coquille telle qu'elle est.

Nous avons supposé que l'effet de ces deux forces opposées est un système oscillatoire: le rayon de la coquille augmente, ce qui réduit la compression du manteau, mais, ce faisant, il grandit trop et met le manteau en état de tension. Celui-ci tire alors vers l'intérieur pour réduire la force de tension, ce qui finit par diminuer trop le rayon de l'ouverture, jusqu'à mettre le manteau dans un état de compression. Une description mathématique de cet «oscillateur morphomécanique» a confirmé notre hypothèse: ce modèle oscillant produit une succession régulière de côtes, avec une longueur d'onde et une amplitude qui augmentent au cours de la croissance et du développement du mollusque. Le modèle prédit fidèlement de nombreuses formes connues d'ammonites.

La modélisation mathématique prédit également que plus le taux d'expansion de la coquille est grand (c'est-à-dire plus l'augmentation de la taille de l'ouverture de la coquille est rapide), moins les côtes sont prononcées. Ces résultats aident à expliquer l'observation selon laquelle une courbure accrue de l'ouverture est corrélée à des côtes plus marquées, tendance que les paléontologues ont remarquée depuis plus d'un siècle.

Cette relation entre le taux d'expansion de l'ouverture et l'aspect plus ou moins côtelé apporte également une explication mécanique et géométrique simple à une énigme de longue date relative à l'évolution des mollusques. Il s'agissait de comprendre pourquoi les coquilles des nautilus fossiles (famille des Nautilidés) sont restées à peu près lisses depuis au moins 200 millions d'années, à l'instar de la coquille de l'actuel genre *Nautilus*, ce qui a conduit un certain nombre d'observateurs à suggérer que ce groupe n'aurait que peu évolué sur cette période. En effet, les rares espèces de nautilus qui subsistent aujourd'hui dans les océans Indien et Pacifique sont souvent qualifiées de fossiles vivants. Cependant, notre modèle biophysique de croissance montre que la nature lisse des

coquilles de Nautilidés est simplement la conséquence mécanique d'une expansion rapide de l'ouverture. La lignée des Nautilidés a peut-être évolué davantage que ne le suggère la morphologie de leur coquille, mais comme les motifs ornementaux caractéristiques utilisés par les

Les côtes de la coquille des ammonites seraient le produit d'un système oscillatoire

BIBLIOGRAPHIE

J.-P. Delahaye, **L'algorithme des coquillages**, *Pour la Science* n° 485, pp. 80-85, mars 2018.

A. Goriely, **The Mathematics and Mechanics of Biological Growth**, Springer, 2017.

A. Erlich et al., **Morphomechanics and developmental constraints in the evolution of ammonites shell form**, *Journal of Experimental Zoology B*, vol. 326(7), pp. 437-450, 2016.

R. Chirat et al., **Mechanical basis of morphogenesis and convergent evolution of spiny seashells**, *PNAS*, vol. 110(15), pp. 6015-6020, 2013.

paléontologues pour distinguer les espèces font défaut dans ce groupe, le taux d'évolution réel des Nautilidés reste difficile à estimer.

Il nous reste beaucoup à apprendre sur la façon dont les mollusques bâtissent leurs formidables demeures. Une courte visite d'une belle collection de coquillages donne à voir plusieurs motifs que les scientifiques ne sont pas encore en mesure d'expliquer.

Par exemple, plus de 90% des gastéropodes sont dextres, c'est-à-dire que si l'on place la pointe de leur coquille vers le haut, l'ouverture se trouve du côté droit. Moins de 10% sont senestres, c'est-à-dire que leur coquille s'enroule dans l'autre sens, vers la gauche. Les scientifiques commencent tout juste à explorer les mécanismes qui conduisent à cette prédominance de la forme dextre.

On ne connaît pas non plus l'origine de certaines ornementsations d'un raffinement extrême, comme le motif plus ou moins fractal d'épines que l'on trouve sur un certain nombre d'espèces de mollusques de la famille des Muricidés (les murex). Par ailleurs, même si nous savons que les facteurs environnementaux influent sur le taux de croissance des coquillages, on connaît mal l'impact de ces variables sur leur forme.

Ces énigmes et d'autres concernant les mollusques à coquilles, organismes modèles pour explorer des questions plus larges sur la formation des motifs dans la nature, montrent que nous avons encore fort à faire. Mais la compréhension des forces physiques mises en jeu dans le développement de ces animaux est à l'évidence l'une des clés nécessaires pour les élucider. ■



L'ESSENTIEL

> Plus de 500 fragments d'ADN existent chez les chimpanzés et d'autres mammifères, mais pas chez les humains : ils ont été perdus au cours de l'évolution.

> Trois de ces séquences contiendraient des « interrupteurs » qui activent des gènes.

> La perte de l'un aurait favorisé la croissance du cerveau. Un autre aurait facilité la marche debout.

> Le troisième aurait contribué à l'évolution de nos comportements vers une concurrence moins intense entre les hommes, et plus de coopération et d'attachement entre hommes et femmes.

L'AUTEUR



PHILIP L. RENO
professeur de sciences
biomédicales au Collège
de médecine ostéopathique
de Philadelphie

L'ADN perdu qui a fait l'homme

Cerveau volumineux, posture debout, stratégie reproductive favorisant le couple... Ces caractéristiques des humains seraient apparues grâce à la disparition, au fil de l'évolution, de fragments clés de notre génome.



Rencontre des grands singes lors d'une visite au zoo ne laisse pas indifférent. D'un côté, leur ressemblance avec nous est frappante. Leurs expressions faciales et la façon dont ils saisissent des objets sont étrangement similaires aux nôtres. Mais, d'un autre côté, chimpanzés, bonobos, orangs-outans et gorilles sont si différents de nous. Notre marche debout, les capacités de notre cerveau et d'autres caractères nous démarquent sans conteste. Quels événements déterminants, au cours de l'évolution, nous ont rendus si spécifiquement humains? Pourquoi sont-ils survenus? Et comment?

Pendant des décennies, les anthropologues et les biologistes évolutionnistes ont buté sur ces questions. Mais aujourd'hui les outils modernes de la génétique leur ouvrent de nouvelles perspectives. Ils ont ainsi montré que, contrairement à ce que l'on pourrait croire, certaines caractéristiques parmi celles qui nous distinguent de nos plus proches parents ne proviennent pas d'ajouts à nos gènes. Au contraire, elles résultent de disparitions de morceaux clés d'ADN.

De nombreuses recherches en laboratoire, dont les miennes, ont suivi la trace de certains de ces segments d'ADN perdus en comparant les génomes humains avec ceux d'autres mammifères et d'humains archaïques: les Néandertaliens et nos cousins moins connus, les hommes de Denisova. Nous avons découvert que pendant les 8 millions d'années écoulées depuis que la lignée humaine a dévié de celle des chimpanzés, les génomes de nos ancêtres se sont délestés de fragments d'ADN qui activent des gènes clés pendant le développement embryonnaire. Les Néandertaliens partagent ces pertes: elles se sont donc produites tôt dans notre histoire évolutive.

En fait, la perte de ces séquences d'ADN serait liée à des traits exclusivement humains: des cerveaux volumineux, une marche debout et des habitudes particulières d'accouplement.

L'ÉPINOCHÉ QUI AVAIT PERDU SES NAGEOIRES

J'ai commencé à m'intéresser à l'évolution humaine dans les années 2000, lors de mon doctorat auprès de l'anthropologue Owen Lovejoy, à l'université d'État de Kent, en étudiant les différences entre les squelettes mâles et femelles chez nos parents humains éteints. J'espérais poursuivre mes recherches dans ce domaine pour comprendre ce qui, dans nos gènes et programmes de développement embryonnaire, avait changé au cours de notre histoire évolutive, et j'ai eu la chance d'obtenir un postdoctorat auprès de David Kingsley, de l'université Stanford, qui travaillait justement sur ces questions.

Entre autres travaux, l'équipe de David Kingsley avait identifié des modifications de l'ADN impliquées dans l'évolution de poissons, les épinoches. Notamment, la disparition d'un fragment d'ADN chez les épinoches d'eau douce s'était révélée avoir causé la perte des nageoires pelviennes épineuses chez cette espèce. Ce morceau d'ADN perdu contenait une sorte d'interrupteur nécessaire à l'activation, dans certaines cellules et à un stade précis du développement, d'un gène impliqué dans le développement de l'épine pelvienne.

Si un tel scénario s'était produit chez les épinoches, pourquoi pas chez les humains? De subtils changements du lieu et du moment où



Les génomes des humains et des chimpanzés diffèrent de 100 millions de bases



s'activent les gènes au cours du développement auraient alors favorisé l'apparition, au cours de l'évolution, de caractères propres à l'espèce humaine.

Inspirés par ces travaux sur l'épinoche, nous sommes partis en quête de tels interrupteurs qui auraient disparu chez les humains au cours de l'évolution. Aujourd'hui, on dispose de génomes séquencés d'humains et de singes, ainsi que d'outils statistiques pour les analyser, ce qui a rendu possibles nos expériences. Avec certains collègues de l'équipe de David Kingsley, nous nous sommes associés à Gill Bejerano, biologiste et informaticien de l'université Stanford, et au doctorant Cory McLean pour concevoir nos expériences.

Retrouver des fragments manquants d'ADN n'est pas une tâche facile, car les génomes sont vastes. Le nôtre contient 3,2 milliards de bases (les constituants de l'ADN), parmi lesquelles environ 100 millions diffèrent entre les humains et les chimpanzés. Comment réaliser notre expérience? Pour comprendre notre approche, quelques précisions sont nécessaires.

Dans le génome d'une espèce, les segments d'ADN qui jouent un rôle important sont préservés de façon très fidèle au cours de l'évolution. En outre, plus deux espèces sont proches, plus leurs séquences génétiques sont >

ALLUMER ET ÉTEINDRE LES GÈNES

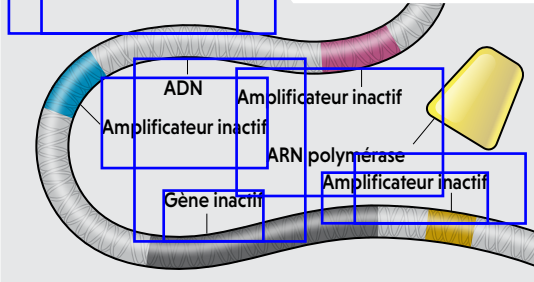
Toutes les cellules du corps humain contiennent les mêmes gènes, mais ceux-ci ne s'expriment ni dans toutes les cellules ni en permanence. Des différents profils d'expression dépendent la croissance et le fonctionnement des diverses parties du corps. Les interrupteurs qui activent l'ADN, nommés amplificateurs, participent au contrôle de ces profils d'expression. Parfois, plusieurs amplificateurs modulent l'expression d'un même gène, changeant ses effets d'un endroit à un autre. Les interrupteurs présents chez d'autres animaux, mais disparus chez les humains, sont peut-être à l'origine de caractères propres à notre espèce.

COMMENT UN AMPLIFICATEUR AGIT

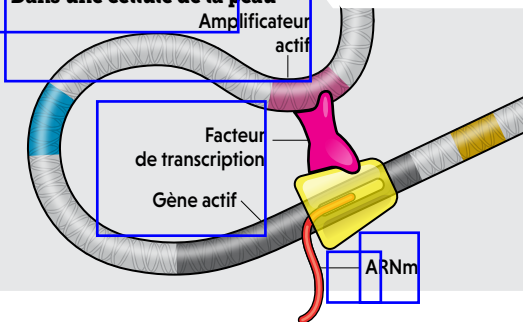
Imaginons un gène contrôlé par trois amplificateurs, dont le statut (actif ou inactif) est différent dans une cellule rénale (à gauche) et dans une cellule de la peau (à droite). La cellule rénale ne produit pas de facteur de transcription, une molécule nécessaire à l'activation des amplificateurs et à l'action de l'ARN polymérase (en jaune), une enzyme

qui décode l'ADN. La cellule de la peau, en revanche, produit un facteur de transcription (en rose) qui se lie à l'amplificateur rose. Le gène est alors activé et l'ARN polymérase se met en marche, transmettant, sous la forme d'une molécule d'ARN messager (ARNm, en rouge) les instructions du gène à la cellule.

Dans une cellule rénale



Dans une cellule de la peau

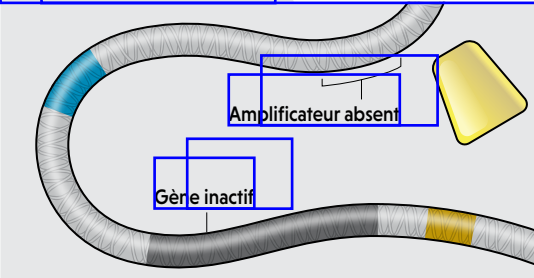


QUAND UN AMPLIFICATEUR DISPARAÎT

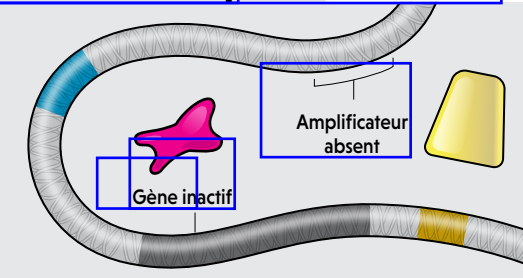
Si l'amplificateur rose est absent, le gène dans la cellule rénale (à gauche) est toujours inactif. En revanche, dans la cellule de la peau (à droite), le gène précédemment actif est maintenant inactif

et ne transmet pas d'instruction à la cellule. Les deux autres amplificateurs (jaune et bleu) continuent de moduler l'activité du gène dans d'autres types de cellules.

Dans une cellule rénale

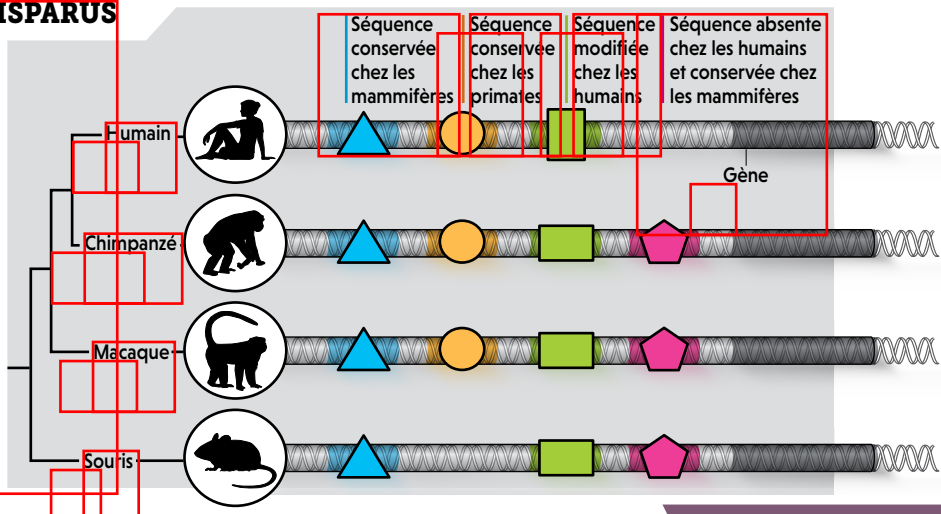


Dans une cellule de la peau



NOS INTERRUPTEURS DISPARUS

Pour trouver des interrupteurs disparus chez les humains, les chercheurs comparent leur ADN non codant avec celui de chimpanzés, de macaques et de souris. Certaines séquences, présentes chez toutes ces espèces, sont sans doute importantes pour tous les mammifères (triangles). D'autres, absentes chez la souris, ne sont importantes que pour les primates (cercles). Des modifications observées seulement chez les humains ont peut-être joué un rôle clé dans notre évolution (rectangles). Enfin, des séquences présentes chez les souris, chimpanzés et macaques, mais absentes chez les humains ont pu contribuer à l'apparition de caractéristiques humaines uniques (pentagones).



➤ similaires. Dans le cas des chimpanzés et des humains, par exemple, les génomes sont identiques à 99% dans la minuscule portion (moins de 1% du génome) qui porte les instructions nécessaires à la production des protéines – l'ADN codant. Et ils le sont à 96% dans le reste du génome – l'ADN non codant.

Nous nous sommes intéressés à cette région non codante de l'ADN, considérée dans le passé comme de l'ADN «poubelle». On sait désormais qu'elle est truffée d'interrupteurs qui activent ou désactivent les gènes. Le rôle de ces interrupteurs est crucial. Bien que la quasi-totalité des cellules du corps humain contiennent les mêmes 20000 gènes, ceux-ci ne sont pas tous actifs partout ni en permanence. Seuls certains gènes sont nécessaires au développement du cerveau, par exemple, et d'autres à la croissance des os ou des cheveux. Puisque les chimpanzés et les humains, en dépit de leurs différences, ont la même structure de base, il n'est pas surprenant que les régions non codantes de leur ADN soient aussi similaires.

500 SÉQUENCES PERDUES

Mais c'étaient les différences au sein de ces régions qui nous intéressaient. Plus précisément, notre objectif était de trouver des séquences qui avaient été préservées au cours de l'évolution chez de nombreuses espèces (signe de l'importance de ces séquences), mais n'étaient plus présentes chez l'humain. À cette fin, nos collaborateurs en génomique ont comparé les génomes de chimpanzés, de macaques et de souris. Ils ont repéré des centaines de fragments d'ADN presque identiques entre les trois espèces. L'étape suivante consistait à parcourir cette liste afin de trouver quels fragments n'existaient pas dans le génome humain et avaient donc été perdus quelque temps après la séparation de notre lignée et de celle du chimpanzé. Nous en avons trouvé plus de 500.

Lesquels étudier? Puisque nous voulions trouver des interrupteurs impliqués dans le développement des mammifères, nous nous

sommes concentrés sur les pertes près de gènes ayant des rôles connus dans ce processus. L'un de mes collègues, Alex Pollen, alors doctorant, s'est intéressé à une séquence perdue près d'un gène qui régule la synthèse des neurones. Vahan Indjeian, alors chercheur en postdoctorat dans le laboratoire, s'est quant à lui penché sur une autre à proximité d'un gène impliqué dans la formation du squelette.

Pour ma part, en raison de mon intérêt pour l'évolution des différences anatomiques entre mâles et femelles, je me suis focalisé sur une séquence disparue près du gène du récepteur des androgènes. Les androgènes telle la testostérone sont des hormones nécessaires au développement des caractères masculins. Synthétisés dans les testicules, ils circulent ensuite dans le sang. En réponse à ces

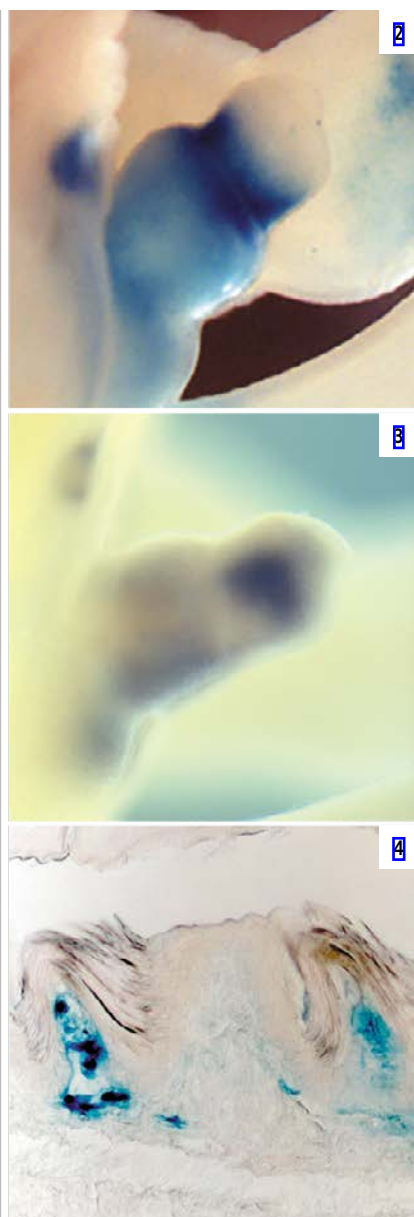
LE TEST DE LA SOURIS BLEUE

Pour savoir si une séquence d'ADN proche d'un gène codant un récepteur d'hormones sexuelles était bien un activateur, les chercheurs ont injecté la séquence dans des embryons de souris après l'avoir attachée à un gène qui colore la cellule en bleu s'il est activé. La coloration bleue est apparue dans des zones qui se développent ensuite en moustaches sensorielles et autres follicules pileux (1), ainsi que dans des cellules qui deviennent le pénis ou le clitoris et les glandes mammaires (2). Or c'est aussi dans cette région qu'est produit le récepteur hormonal, ce qui est compatible avec l'idée que la séquence serait un activateur du récepteur (3). Chez les souris mâles adultes, l'interrupteur est particulièrement actif dans les cellules formant les épines du pénis (4).



© Philip L. Reng

Le cerveau humain est bien plus volumineux que celui du chimpanzé : 1400 contre 400 cm³



messagers, les cellules qui produisent des récepteurs des androgènes suivent alors un schéma de développement masculin: formation d'un pénis au lieu d'un clitoris, par exemple, ou, plus tard dans la vie, apparition de barbe et élargissement du larynx lié à une voix plus grave.

Avant toute chose, nous devions vérifier si les fragments perdus d'ADN contenaient réellement des interrupteurs. Nous les avons donc extraits de l'ADN du chimpanzé et de la souris afin de les associer à un gène particulier qui colore les cellules en bleu quand il est activé. L'association était telle que si les séquences d'ADN testées contenaient bien des activateurs, ceux-ci activeraient le gène qui colore les cellules.

Nous avons ensuite injecté ces assemblages dans des ovules fécondés de souris et avons observé le développement des embryons. Si certaines parties des embryons devenaient bleues durant le développement, nous aurions alors une preuve de la présence d'un interrupteur fonctionnel. Nous saurions aussi dans quels tissus cet interrupteur agit et à quel stade du développement.

Les résultats avec le fragment d'ADN perdu près du gène du récepteur des androgènes furent enthousiasmants: ils suggéraient que j'étais réellement en présence d'un interrupteur de ce récepteur, que les humains auraient perdu au cours de l'évolution. Dans les embryons de souris, le tubercule génital (qui se développe en clitoris ou en pénis) était teinté en bleu, tout comme les glandes mammaires en développement et les zones sur le museau de la souris où se trouvent les moustaches sensorielles appelées vibrisses. Tous ces tissus sont connus pour produire des récepteurs des androgènes sensibles à la testostérone.

En observant de plus près, j'ai remarqué que les touches de bleu sur les organes génitaux

en développement étaient situées à des endroits où de petites épines se forment ultérieurement sur le pénis de la souris. Bien sûr, les hommes ne portent ni vibrisses ni épines sur leur pénis. Mais ces caractères se retrouvent chez nombre de mammifères, y compris les souris, les singes et les chimpanzés. On sait également que, privés de testostérone, d'une part des rongeurs mâles ont des moustaches plus courtes et, d'autre part, des rongeurs et des primates ont un pénis sans épines. Et si, de même, les épines et les vibrisses avaient disparu chez les humains à la suite de la perte d'un interrupteur clé de l'ADN – perte qui aurait bloqué la fabrication du récepteur des androgènes dans les tissus?

UN CERVEAU PLUS GROS GRÂCE À UN BOUT D'ADN DISPARU?

Tandis que je poursuivais mes expériences, mes collègues étudiaient d'autres fragments perdus d'ADN et leurs résultats étaient tout aussi intrigants. Alex Pollen a constaté que son fragment activait un gène dont il était proche, dans des régions précises du cerveau en développement. Or ce gène joue un rôle clé: il participe à la destruction des neurones produits en excès lors du développement embryonnaire. Le cerveau humain est bien plus volumineux que celui du chimpanzé: 1400 centimètres cubes contre 400. La perte de cet interrupteur aurait-elle contribué à cette évolution en supprimant les freins de la croissance neuronale?

De même, Vahan Indjeian a constaté que son interrupteur activait un gène impliqué dans la croissance des membres postérieurs et en particulier des orteils. Or quatre des orteils humains sont plus courts que chez les singes et les souris, ce qui facilite la marche debout.

Il est aisé d'imaginer comment ces deux interrupteurs cérébraux et osseux s'intègrent dans le modèle de l'évolution humaine. Leur perte semble liée à des caractéristiques de l'espèce humaine: la bipédie et un cerveau plus développé. On comprend aussi sans difficulté pourquoi la perte des moustaches sensorielles n'a pas désavantagé les humains: ceux-ci ne fouillent plus dans le noir à l'aide de leur museau pour chercher de la nourriture ou capturer une proie, mais utilisent leurs mains en plein jour. Toutefois, on ne sait pas pour autant pourquoi la perte de vibrisses a été sélectionnée au cours de l'évolution.

L'intérêt de la perte des épines péniennes est moins intuitif, mais il s'inscrit tout aussi bien dans l'histoire adaptative de notre espèce. Cette disparition ferait partie d'une série de changements qui ont eu des effets de grande ampleur sur notre histoire évolutive. L'ensemble de ces événements ont modifié la façon dont nous nous accouplons, l'apparence

> physique des hommes et des femmes, nos relations les uns avec les autres et la manière d'élever nos enfants. Ces épines sont présentes chez de nombreux mammifères, y compris les primates, les rongeurs, les chats, les chauves-souris et les opossums. Elles sont constituées de kératine, comme nos ongles, et se présentent sous des formes variées, allant de cônes microscopiques à des épis ou des pointes à plusieurs branches. Elles remplissent différents rôles selon les espèces : augmenter la stimulation, induire l'ovulation, ôter les spermatozoïdes déposés par d'autres mâles ou irriter la paroi vaginale, ce qui limite l'intérêt des femelles à s'accoupler avec d'autres mâles.

La durée de l'accouplement chez les primates pourvus d'épines est remarquablement courte : moins de dix secondes chez le chimpanzé en général. Des expériences menées en 1990 au Gabon par le primatologue Alan Dixson chez le ouistiti montrent que l'élimination des épines pénienues augmente de deux tiers le temps de copulation. À partir de telles observations, il est tentant de penser que la perte des épines pénienues est l'un des événements qui a rendu l'acte sexuel plus long et donc plus intime comparé à celui de nos ancêtres porteurs d'épines. L'idée est plaisante, mais ces changements ont probablement surtout servi notre espèce d'un point de vue évolutif.

MOINS DE CONCURRENCE ET PLUS DE COOPÉRATION

Notre stratégie de reproduction est différente de celle de tous les grands singes, qui repose sur une compétition intense entre les mâles. Chez les chimpanzés et les bonobos, les mâles rivalisent pour s'accoupler avec autant de femelles fertiles que possible. Ils produisent de grandes quantités de spermatozoïdes (les testicules des chimpanzés sont trois fois plus gros que ceux des humains), leur pénis est pourvu d'épines et, comme tous les grands singes, ils sont dotés de canines mortelles qui découragent les rivaux. Ils laissent entièrement à la femelle le soin de la progéniture. Ainsi, pour elle, un accouplement réussi entraîne un engagement considérable, car elle porte, allaite et élève chaque petit jusqu'à son indépendance. Et la femelle ne se reproduit pas tant que le sevrage n'est pas terminé.

Les comportements des humains sont différents. Ceux-ci forment des couples plutôt fidèles. Les hommes aident souvent à élever les enfants, ce qui permet un sevrage plus précoce et augmente le taux de reproduction. La concurrence entre hommes n'est pas aussi intense. Nous pensons que la perte des épines pénienues s'est accompagnée de celle d'autres caractères liés à une concurrence féroce, comme les canines, et du gain

Si l'on élimine les épines pénienues d'un ouistiti, celui-ci copule plus longtemps

de caractéristiques qui favorisent l'attachement et la coopération.

Selon Owen Lovejoy, la bipédie en ferait partie. Les hommes ont probablement commencé à aider les femmes à élever les petits en leur procurant des aliments riches en matière grasse et en protéines, tels que des larves, des insectes et de petits vertébrés, ce qui nécessitait une recherche et un transport sur de longues distances. Ils ont donc dû voyager loin avec les mains libres pour porter leurs trouvailles, ce qui a probablement fourni l'avantage sélectif initial pour la marche sur deux jambes.

Et ce n'est pas tout. L'approvisionnement et la coopération auraient permis aux parents d'élever plus longtemps une progéniture dépendante et d'allonger ainsi la période juvénile au-delà du sevrage. Le temps consacré à l'apprentissage serait devenu alors plus long, augmentant par conséquent l'intérêt d'être doté d'un gros cerveau. En ce sens, l'histoire des trois pertes évoquées est liée.

Quand je suis arrivé au laboratoire de David Kingsley, j'étais loin d'imaginer la tournure que mon travail prendrait, et que je me retrouverais plongé dans des textes de 1940 sur les structures génitales des mammifères. Aujourd'hui, mon laboratoire poursuit ses recherches sur le sujet ainsi que sur d'autres modifications génétiques aux conséquences décisives : la mise en forme au cours de l'évolution des os délicats des poignets humains qui les rend parfaitement adaptés au maniement d'outils.

Quels que soient les efforts que nous déploierons, certains pans de notre histoire lointaine demeureront un mystère. Nous ne saurons jamais avec certitude pourquoi un caractère a été sélectionné au cours de l'évolution. Néanmoins, grâce aux outils de la biologie moléculaire moderne, nous sommes à présent en mesure de savoir comment les changements surviennent – une question tout aussi cruciale et fascinante. ■

BIBLIOGRAPHIE

V. B. Indjeian et al., **Evolving new skeletal traits by cis-regulatory changes in bone morphogenetic proteins**, *Cell*, vol. 164(1-2), pp. 45-56, 2016.

P. L. Reno, **Genetic and developmental basis for parallel evolution and its significance for hominoid evolution**, *Evolutionary Anthropology : Issues, News, and Reviews*, vol. 23(5), pp. 188-200, 2014.

P. L. Reno et al., **A penile spine/vibrissa enhancer sequence is missing in modern and extinct humans but is retained in multiple primates with penile spines and sensory vibrissae**, *Plos One*, vol. 8(12), Article e84258, 2013.

C. Y. McLean et al., **Human-specific loss of regulatory DNA and the evolution of human-specific traits**, *Nature*, vol. 471, pp. 216-219, 2011.

C. O. Lovejoy, **Reexamining human origins in light of *Ardipithecus ramidus***, *Science*, vol. 326, pp. 74-74e8, 2009.

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

OFFRE RENTRÉE 1 AN

3 FORMULES
AU CHOIX

	FORMULE PAPIER	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier (12 numéros par an)	✓	✓	✓
Le hors-série papier (4 numéros par an)		✓	✓
L'accès en ligne illimité www.pourlascience.fr			✓
L'édition numérique du magazine (12 numéros par an)			✓
L'édition numérique du hors-série (4 numéros par an)			✓
L'accès aux archives numériques depuis 1996			✓
10 € DE RÉDUCTION		✓	✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	59€ Au lieu de 82,80€	69€ Au lieu de 114,40€	89€ Au lieu de 174,40€
	29 % de réduction*	40 % de réduction*	49 % de réduction*

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Pour la Science – Service abonnements – 19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex – email: pourlascience@abopress.fr

PAG18REN



**OUI, je m'abonne
pour 1 an à
POUR LA
SCIENCE**

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)

- ☐ **FORMULE INTÉGRALE**
 • 12 n° du magazine papier
 • 4 Hors-série papier
 • Accès illimité aux contenus en ligne
89€
 Au lieu de 174,40€
- ☐ **FORMULE PAPIER + HORS SÉRIE**
 • 12 n° du magazine papier
 • 4 Hors-série papier
69€
 Au lieu de 114,40€
- ☐ **FORMULE PAPIER**
 • 12 n° du magazine papier
59€
 Au lieu de 82,80€

2 / J'indique mes coordonnées

☐ M. ☐ Mme

Nom: Prénom:

Adresse:

Code postal: Ville:

Téléphone:

Email: (indispensable pour la formule intégrale)

.....@.....

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / Je choisis mon mode de règlement

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Carte bancaire

N°: Clé (Les 3 chiffres au dos de votre CB):

Date d'expiration: Clé (Les 3 chiffres au dos de votre CB):

Signature obligatoire:

Reduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement: 1 an. Délai de livraison: dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2019 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site <https://boutique.pourlascience.fr>. Photos non contractuelles.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société Pour la Science. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. Pour la Science ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante: <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit «RGPD») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

Le CNRS propose un catalogue de plus de **250 formations technologiques** à destination des entreprises pour l'année 2019

Son organisme de formation continue présente un large panel de stages courts (3 jours en moyenne) dans les domaines suivants :

DONNÉES, CONNAISSANCES, APPRENTISSAGE

BIOINFORMATIQUE

GÉNIE LOGICIEL ET SYSTÈMES D'INFORMATION

TERRITOIRE, PATRIMOINE ET ENVIRONNEMENT

SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

PHYSIQUE ET INSTRUMENTATION

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX

CHIMIE, SYNTHÈSE, PROCÉDÉS

CHIMIE ANALYTIQUE

MICROSCOPIE ET IMAGERIE

BIOLOGIE CELLULAIRE ET MICROBIOLOGIE

BIOLOGIE MOLÉCULAIRE ET BIOCHIMIE

BIOLOGIE ANIMALE ET FORMATIONS RÉGLEMENTAIRES

RISQUES ET ORGANISATIONS

ENJEUX SOCIÉTAUX

Cet outil de transfert des savoirs et savoir-faire du CNRS permet de **former plus de 1300 professionnels chaque année** issus des secteurs privé (PME et grands groupes) et public.

LES NOUVEAUTÉS PROPOSÉES PAR CNRS FORMATION ENTREPRISES EN 2019

DONNÉES, CONNAISSANCES, APPRENTISSAGE

- Introduction au machine learning et au deep learning, mise en oeuvre en Python du 20 au 22/03/19
Paris - 3 jours 1 800 €
- Deep learning pour le traitement automatique des langues du 25 au 27/03/19
Gif-sur-Yvette - 3 jours 1 500 €
- Le crowdsourcing : plateformes, applications, algorithmes et perspectives de recherche du 03 au 05/04/19
Grenoble - 3 jours 1 500 €
- Introduction à l'analyse causale du 13 au 15/05/19
Paris - 3 jours 1 300 €
- Plans d'expériences pour l'entreprise du 17 au 18/06/19
Grenoble - 2 jours 900 €
- Statistiques pour le Lean 6 Sigma et la production du 27 au 28/06/19
Grenoble - 2 jours 1 000 €
- Stochastic Optimization for Large-Scale Systems du 04 au 08/11/19
Marseille - 4 jours 2 000 €

BIOINFORMATIQUE

- Bioinformatique pour le traitement de données de séquençage (NGS) du 16 au 20/09/19
Lyon - 5 jours 2 100 €

GÉNIE LOGICIEL ET SYSTÈMES D'INFORMATION

- Prototypage rapide d'applications orientées flot de données avec NodeRED le 14/03/19
Grenoble - 1 jour 500 €
- Introduction à OpenACC et OpenMP GPU le 28/03/19
Orsay - 1 jour 450 €
- Blockchains de consortium : concepts et mise en pratique du 16 au 17/05/19
Grenoble - 2 jours 1 200 €
- Les infrastructures Cloud : concepts et pratique du 04 au 07/06/19
Grenoble - 3 jours 1 200 €
- Gestion décentralisée de versions avec GIT du 13 au 14/06/19
Grenoble - 2 jours 1 000 €
- Concepts et mise en pratique des conteneurs logiciels avec Docker du 20 au 21/06/19
Grenoble - 2 jours 1 000 €

- Mathematics behind Blockchain du 30/09 au 02/10/19
Marseille - 3 jours 1 600 €

TERRITOIRE, PATRIMOINE ET ENVIRONNEMENT

- Modélisation du paysage visible : initiation au logiciel Pixscape du 09 au 10/05/19
Besançon - 2 jours 800 €
- Emissions de gaz à effet de serre par les écosystèmes aquatiques (lacs, rivières), les zones humides et les retenues de barrage : processus en jeu et quantification du 13 au 15/05/19
Toulouse - 3 jours 1 300 €

SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

- Réseaux Internet des objets longue distance : concepts et mise en pratique du 11 au 13/03/19
Grenoble - 3 jours 1 800 €
- Traitement d'images en Python avec scikit-image du 12 au 13/06/19
Orsay - 2 jours 850 €
- Visualisation et transformation des séquences de mouvements 3D du 27 au 28/06/19
Poitiers - 2 jours 700 €



Découvrez l'ensemble des stages de formation sur **CNRSformation.cnrs.fr**
Ou contactez-nous à cfe.contact@cnrs.fr ou 01 69 82 44 55

- **Modélisation et simulations numériques en physique et en science des matériaux**
du 11 au 13/09/19
Strasbourg - 3 jours 1 200 €

PHYSIQUE ET INSTRUMENTATION

- **Fibres optiques : manipulation, réparation et entretien pour la maintenance des appareils et composants fibrés**
du 11 au 13/03/19
Besançon - 3 jours 1 200 €
- **Méthodes innovantes pour la caractérisation et l'imagerie des milieux diffusants**
du 25 au 26/03/19
Paris - 2 jours 1 200 €

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX

- **Systèmes nanoparticulaires : préparation et techniques de caractérisation**
du 27 au 29/03/19
Montpellier - 3 jours 1 500 €
- **Microanalyse élémentaire des solides par microsonde électronique**
du 30/09 au 02/10/19
Villeneuve d'Ascq - 3 jours 1 600 €
- **Physico-chimie des polymères et propriétés mécaniques**
du 18 au 20/11/19
Paris - 3 jours 1 750 €
- **Nanocellulose issue de la biomasse : production et caractérisation**
du 26 au 28/11/19
Grenoble - 2,5 jours 1 200 €

CHIMIE, SYNTHÈSE, PROCÉDÉS

- **La catalyse photoredox : un outil puissant en synthèse organique**
du 03 au 04/06/19
Caen - 2 jours 900 €
- **Fluorescence et fluorophores organiques : théorie, synthèse, bioconjugaison et applications**
du 01 au 02/07/19
Mont-Saint-Aignan - 2 jours 1 200 €
- **Technologies microfluidiques : principes et applications**
du 26 au 27/09/19
Paris - 2 jours 1 300 €
- **Mise en forme de polymères par électrospinning : principes et applications**
le 12/11/19
Grenoble - 1 jour 600 €

- **Le chauffage micro-onde : généralités et applications à la chimie en solution et aux mélanges polymériques**
du 28 au 29/11/19
Dijon - 2 jours 900 €

CHIMIE ANALYTIQUE

- **Analyse quantitative de petites molécules par LC-MS**
du 11 au 13/03/19
Mont-Saint-Aignan - 3 jours 1 400 €
- **HPLC préparative appliquée à la purification de peptides**
du 12 au 13/03/19
Montpellier - 2 jours 1 300 €
- **HPLC des polymères**
le 19/03/19
Marseille - 1 jour 700 €
- **Préparation des échantillons pour l'analyse de protéines et de peptides par spectrométrie de masse**
le 17/05/19
Gif-sur-Yvette - 1 jour 700 €
- **Analyse de modifications post-traductionnelles chez les bactéries**
du 18 au 20/06/19
Mont-Saint-Aignan - 3 jours 1 800 €
- **Analyse structurale des oligo- et polysaccharides**
du 19 au 21/11/19
Grenoble - 3 jours 1 400 €
- **Electrophorèse capillaire avancée et application aux protéines et peptides**
du 20 au 22/11/19
Châtenay-Malabry - 3 jours 1 600 €
- **Spectrométrie de mobilité ionique couplée à la spectrométrie de masse (IMS-MS)**
du 21 au 22/11/19
Mont-Saint-Aignan - 2 jours 1 200 €
- **Analyses en ligne par GC-MS, GC-MS/MS et GC/Q-TOF de micropolluants organiques dans des matrices environnementales**
du 03 au 05/12/19
Talence - 2,5 jours 1 300 €
- **Chromatographie ionique**
du 05 au 06/12/19
Toulouse - 2 jours 1 200 €
- **MICROSCOPIE ET IMAGERIE**
 - **Clarification pour l'imagerie tridimensionnelle d'objets biologiques complexes**
du 25 au 28/06/19
Paris - 4 jours 1 600 €

- **La déconvolution d'images pour la microscopie photonique : bases théoriques et pratiques**
du 01 au 03/10/19
Toulouse - 3 jours 1 100 €

- **Cryo MEB pour la matière molle : préparation des échantillons, observation et analyse**
du 08 au 10/10/19
Strasbourg - 2,5 jours 1 800 €

BIOLOGIE CELLULAIRE ET MICROBIOLOGIE

- **hiPSC : culture et contrôle qualité des cellules souches à pluripotence induite**
du 01 au 03/07/19
Lyon - 3 jours 2 500 €
- **Le phagogramme : un outil de référence pour l'utilisation de phages thérapeutiques en santé humaine**
du 24 au 26/09/19
Marseille - 3 jours 1 300 €

BIOLOGIE MOLÉCULAIRE ET BIOCHIMIE

- **Préparer des banques NGS à partir d'ADN et d'ARN : les étapes pratiques et méthodologiques appliquées à la technologie Illumina**
du 03 au 05/06/19
Lyon - 3 jours 2 000 €

BIOLOGIE ANIMALE ET FORMATIONS RÉGLEMENTAIRES

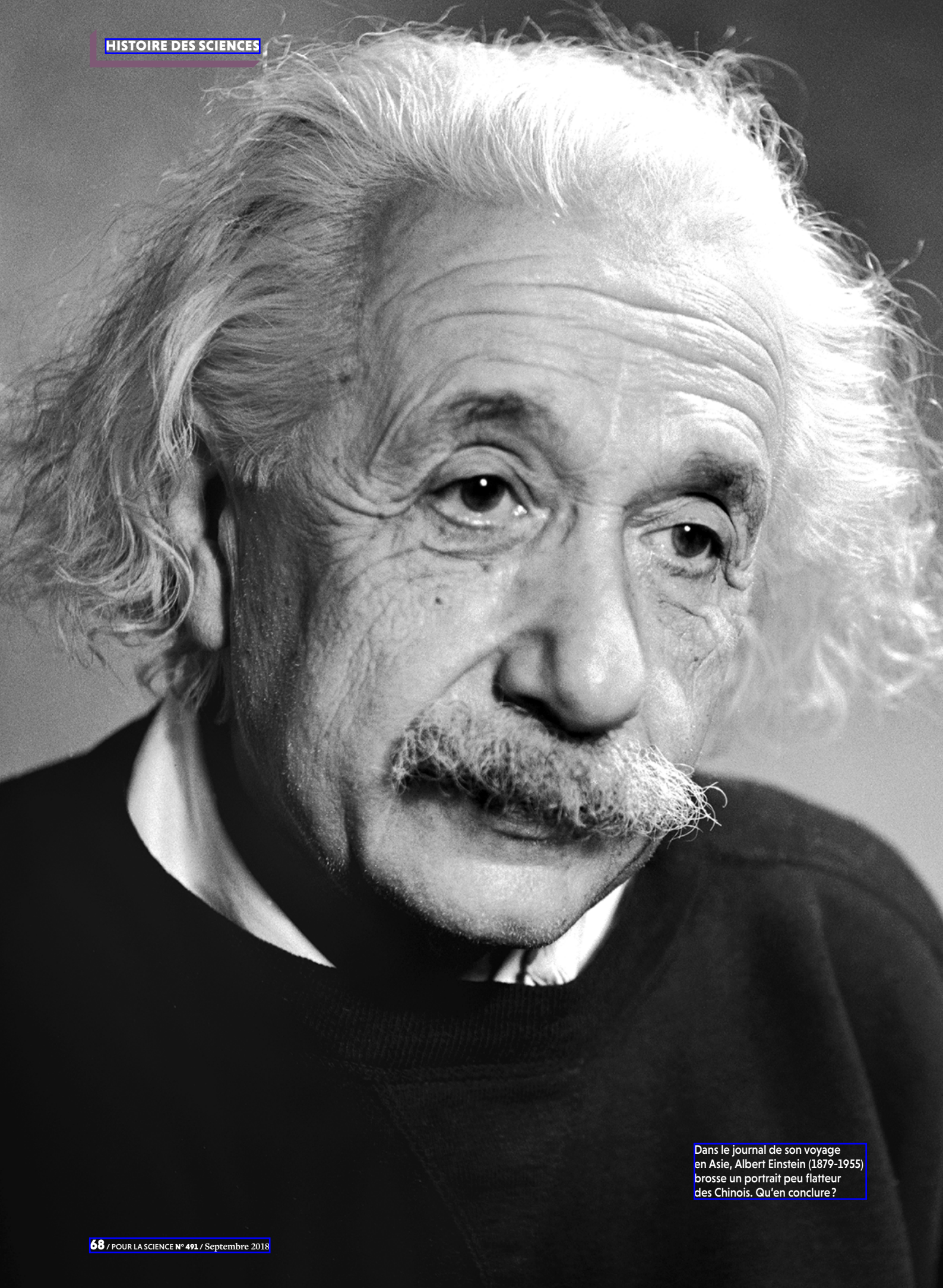
- **Le risque termites, de la biologie des espèces à la réglementation**
du 12 au 13/03/19
Tours - 1,5 jours 700 €
- **Mouse embryology: practical training course**
du 13 au 15/03/19
Illkirch - 3 jours 1 700 €

RISQUES ET ORGANISATIONS

- **Plateforme, mutualisation d'instruments scientifiques (mi-lourds) : création, développement et valorisation d'un service**
du 4 au 7/11/19
Marseille - 4 jours 1 800 €

ENJEUX SOCIÉTAUX

- **Radicalités : aspects juridique, sociétal et idéologique**
Sur demande uniquement
Toulouse - 3 jours [Nous consulter](#)
- **Laïcité et faits religieux**
du 13 au 14/06/19
Toulouse - 2 jours 800 €



Dans le journal de son voyage en Asie, Albert Einstein (1879-1955) brosse un portrait peu flatteur des Chinois. Qu'en conclure?

L'ESSENTIEL

> La publication, en mai dernier, d'un journal qu'Einstein tenait lors de son voyage en Asie en 1922-1923, a suscité émoi et déception, certains l'accusant d'y tenir des propos racistes.

> Les racines de cette réaction épidermique remontent au XVII^e siècle, quand les savants, après s'être construit

une légitimité à énoncer des vérités universelles, se sont attribué une image d'idéal ascétique.

> Dès lors, savants et États ont concouru à créer une image de la science qui réponde à leurs intérêts respectifs.

> La légende de Newton en donne un exemple édifiant.

L'AUTEUR



YANNICK FONTENEAU
docteur en histoire
des sciences et professeur
de sciences physiques
au Lycée français de Bilbao,
en Espagne.

Einstein, Newton, Pasteur... n'étaient pas des saints

Einstein n'était pas un saint, et Newton était manipulateur et ésotérique. Pourquoi sommes-nous si déçus de l'apprendre ? Pour le comprendre, il faut remonter au XVII^e siècle, quand la figure du savant a commencé à jouer un rôle politique.

La nouvelle ne laisse personne indifférent : Einstein aurait été xénophobe, voire raciste. En cause, des passages de ses mémoires de voyage en Asie, notamment en Chine, dans les années 1922-1923. Une première traduction en anglais de son journal était parue en 2012 au sein des œuvres complètes d'Einstein, mais n'avait pas atteint le grand public. En mai dernier, cependant, Ze'ev Rosenkranz, éditeur et directeur adjoint du *Einstein Papers Project*, en a publié une nouvelle traduction remarquée sous le titre *The Travel Diaries of Albert Einstein, The Far East, Palestine, and Spain, 1922-1923*.

De fait, plusieurs exemples de préjugés surgissent sous la plume d'Einstein. Cet

humaniste, qui s'impliquera dans les luttes pour les droits civiques aux États-Unis, qualifie alors les Chinois de « sales et obtus ». « Même ceux qui sont réduits à travailler comme des chevaux ne donnent jamais l'impression d'une souffrance consciente », commente-t-il à leur propos. « Une étrange nation semblable à un troupeau [...] ressemblant souvent plus à des automates qu'à des gens. » D'après Ze'ev Rosenkranz, « les passages du journal d'Einstein sur l'origine biologique de l'infériorité intellectuelle présumée des Japonais, des Chinois et des Indiens ne sont pas du tout discrets et peuvent être considérés comme racistes [...] ». Le commentaire inquiétant selon lequel les Chinois peuvent « supplanter toutes les autres races » est aussi très révélateur à cet égard. »

Notons pourtant qu'à son retour à Hong Kong, début janvier 1923, il décrit les Chinois comme «le peuple le plus désolant de la terre, cruellement maltraité et mis au travail jusqu'à la mort en échange de sa modestie, sa délicatesse et sa frugalité». Puis à Colombo, transporté en pousse-pousse, il écrit: «J'avais très honte de moi de participer ainsi à un si méprisable traitement d'êtres humains, mais je n'y pouvais rien

mais le fond de l'affaire n'est pas là. En effet, à lire ces quelques phrases, nous sommes déçus. Comme si elles devaient effacer tout le reste de son œuvre et de son engagement humaniste. Mais d'où vient notre propension à voir, dans ces figures du génie scientifique, des héros et même des saints? Pourquoi diable Einstein devrait-il être immaculé, irréprochable? Pourquoi sommes-nous déçus à chaque nouvelle révélation (et elles ne manquent pas) sur ces «génies de la science»?

À partir de la seconde moitié du XVII^e siècle, le savant ne se contente plus de dire le Vrai

faire.» Par ailleurs, lors de sa visite du mur des Lamentations, à la fin de son voyage, il décrit ses «ternes frères ethniques [...]». Misérable vue d'un peuple avec un passé mais sans présent.» Si on interprétait ces passages comme les éléments à charge cités par Ze'ev Rosenkranz, on serait peut-être conduit à qualifier Einstein, juif et engagé dans la création de l'État d'Israël, d'antisémite, ce qu'il n'était pas.

Cette mise en perspective ne suffit cependant pas à dégager Einstein de sa responsabilité, car non seulement d'autres que lui montrent à la même époque plus d'ouverture d'esprit, mais Einstein lui-même s'engagera dans les luttes pour l'égalité entre Noirs et Blancs, et ce quelques années à peine après son voyage en Asie. Ainsi, en 1931, il soutiendra une campagne pour défendre les Scottsboro Boys, neuf adolescents d'Alabama faussement accusés de viol. Einstein verra très bien la similitude de traitement entre les Noirs aux États-Unis et les Juifs en Europe et ne pourra y être indifférent. Comment donc à la même époque Einstein pouvait-il présenter un tel contraste de pensée?

En réalité, la chose ne surprend que ceux qui voient dans la figure du scientifique un paragon de la vertu. Einstein n'a pas d'idéologie raciste, loin de là, mais il a des préjugés. Ceux d'un bourgeois occidental élitiste de la charnière des XIX^e et XX^e siècles, habitué à juger les autres peuples à l'aune de ses propres valeurs culturelles. Et qui plus est en voyage, écrivant des impressions quotidiennes dans un journal privé.

Il est certes dommage qu'il semble ainsi souscrire à l'idée d'un «caractère national»,

LE SAVANT, NOUVELLE IMAGE D'UN IDÉAL ASCÉTIQUE

Les racines de ce réflexe culturel sont profondes: elles prennent leur origine il y a plus de trois siècles dans l'émergence de la science moderne comme champ spécifique, dont la création des académies des sciences en Europe fut une conséquence. Au XVII^e siècle, la science et l'homme de savoir se voient attribuer des caractéristiques et des fonctions qui, hier encore, appartenaient seulement à l'homme de religion: découvrir des vérités universelles, faire preuve de modération et de désintéressement vis-à-vis des vanités du monde.

Dans cette optique, c'est un contresens que de considérer la révolution scientifique des XVI^e et XVII^e siècles comme celle de l'opposition entre science et religion. S'il est exact que certains savants (dont Galilée) eurent maille à partir sur des points précis avec les autorités ecclésiastiques, la plupart des savants de l'époque étaient profondément religieux et considéraient la nouvelle rationalité comme un précieux allié de la religion, apte à la purger des superstitions et corroborer l'existence de Dieu par des méthodes indépendantes. Étudier la Nature, d'essence divine, c'était rendre intelligible le dessein de Dieu. De là toute la rhétorique de l'Univers comme horloge, au mécanisme trop parfait pour ne pas être l'œuvre d'un Grand Horloger.

A partir de la seconde moitié du XVII^e siècle, le savant ne se contente plus de dire le Vrai. Il argumente de son utilité pour la société afin de concurrencer les tenants traditionnels des sphères de pouvoir et décisionnelles, et s'y placer. Dans le cas particulier de l'Académie royale des sciences de Paris (fondée en 1666 et dont le rôle s'accroîtra après sa réforme de 1699), on assiste à une légitimation réciproque entre le monde scientifique et l'État.

L'État se légitime en mettant la science (auréolée de son prestige intellectuel et de l'universalité de sa faculté de juger) au cœur de ses procédures de décision. Il table sur ses capacités à quantifier, optimiser et améliorer la production et manifeste ainsi au public sa volonté d'améliorer les conditions économiques. Cette intégration se réalise pleinement à partir de 1716 et l'enquête du régent Philippe

SUBLIME SCIENCE

« Personne n'avait mieux que lui rappelé du Ciel les Mathématiques, pour les occuper aux besoins des Hommes, et elles avoient pris entre ses mains une utilité aussi glorieuse peut-être que leur plus grande Sublimité. De plus l'Académie lui devoit une reconnaissance particulière de l'estime qu'il avoit toujours eue pour elle; les avantages solides que le Public peut tirer de cet établissement avoient touché l'endroit le plus sensible de son ame. »

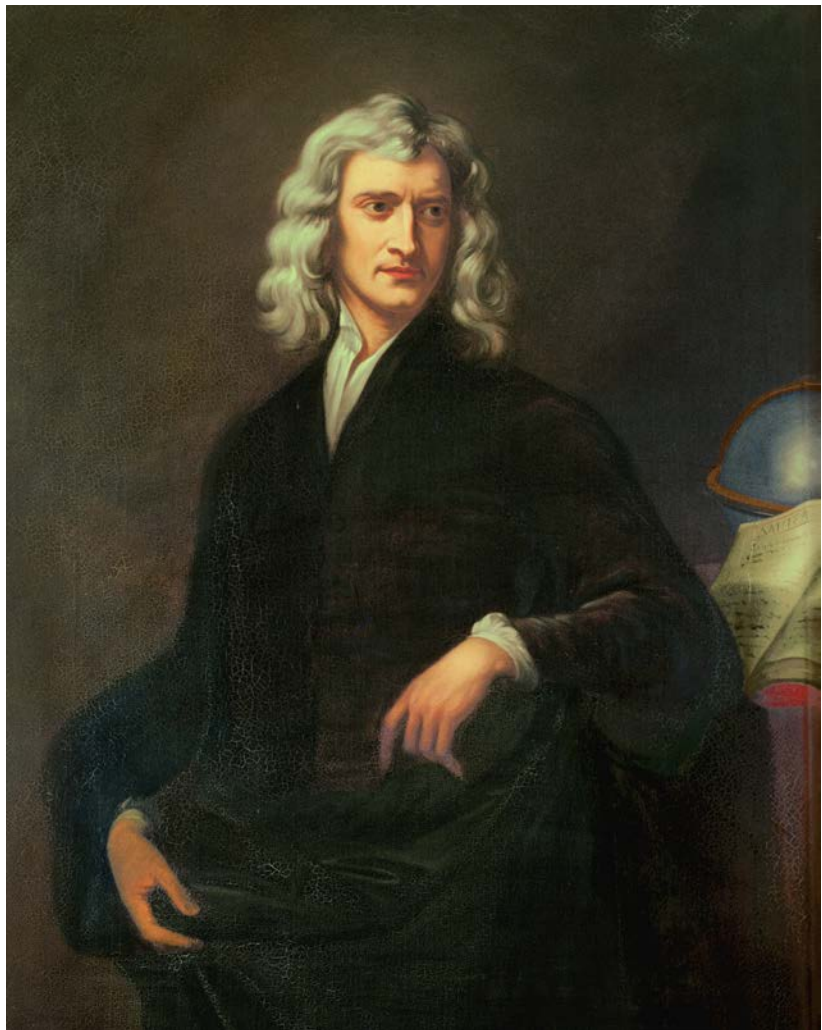
Eloge de M. de Vauban, Fontenelle, 1707

d'Orléans sur les ressources naturelles de la France, que celui-ci confie à l'Académie: d'institution soutenue par l'État, l'Académie devient une institution au cœur de l'appareil d'État.

Parallèlement, la science se légitime en mettant l'accent sur l'utilité intrinsèque de ses démarches pour l'État. Cela donne aux savants une prise pour réclamer le statut social qu'ils convoient. À travers ces évolutions se joue une mutation de l'art de gouverner: la politique ne s'affirme plus dans un rapport direct du souverain à ses sujets et à son royaume, mais dans la compétence scientifique d'une administration.

Dans ce contexte, calquer l'image du savant sur celle de l'homme de religion permet aux Académiciens de renvoyer aux aristocrates des valeurs qu'ils apprécient, et ainsi de s'en faire accepter et d'intégrer les jeux de pouvoirs. En même temps, cette image vise à promouvoir une plus grande insertion sociale des sciences et à susciter des vocations. Vocations d'autant plus légitimes qu'elles seront perçues comme issues de dispositions intellectuelles exceptionnelles d'une petite caste d'élus.

L'accession effective de savants à de hauts postes décisionnels aux XVIII^e et XIX^e siècles est cependant partielle: l'homme de science ne remplace pas totalement l'homme de religion ni le conseiller d'État. Néanmoins, le savant et la raison (ou leurs images) sont propulsés au-delà de l'histoire, dans un rôle de guide pour la société entière. Le panégyrique que le savant Bernard Le Bouyer de Fontenelle écrit en 1707 pour l'ingénieur et architecte Vauban en offre une illustration remarquable (voir l'encadré page ci-contre).



NEWTON, LA LÉGENDE DU PÈRE DE LA RAISON

L'éloge de Newton en 1727 donne une autre occasion à Fontenelle de broser le portrait caricatural du saint génie, pur et désintéressé. Informé par John Conduitt, un proche du savant anglais, Fontenelle décrit Newton comme «né fort doux» et qui aurait «mieux aimé être inconnu que de voir le calme de sa vie troublé par ces orages littéraires, que l'Esprit & la Science attirent à ceux qui s'élèvent trop.» D'ailleurs, sa modestie «s'est toujours conservée sans altération, quoique tout le monde fût conjuré contre elle» et «il n'agissoit jamais, d'une manière à faire soupçonner aux Observateurs les plus malins le moindre sentiment de vanité». «Il étoit simple, affable, toujours de niveau avec tout le monde. Les génies du premier ordre ne méprisent point ce qui est au-dessous d'eux, tandis que les autres méprisent même ce qui est au-dessus. [...] il sçavoit n'être, dès qu'il le falloit, qu'un homme du commun.»

Quant à se marier, Newton ne l'a pas fait «& peut-être n'a-t-il pas eu le loisir d'y penser jamais, abîmé d'abord dans des études

A sa mort, Isaac Newton (1643-1727) a été encensé à un tel point que son histoire est devenue la légende d'un saint... jusqu'à ce qu'au XIX^e siècle des historiens en brossent un portrait bien moins flatteur.

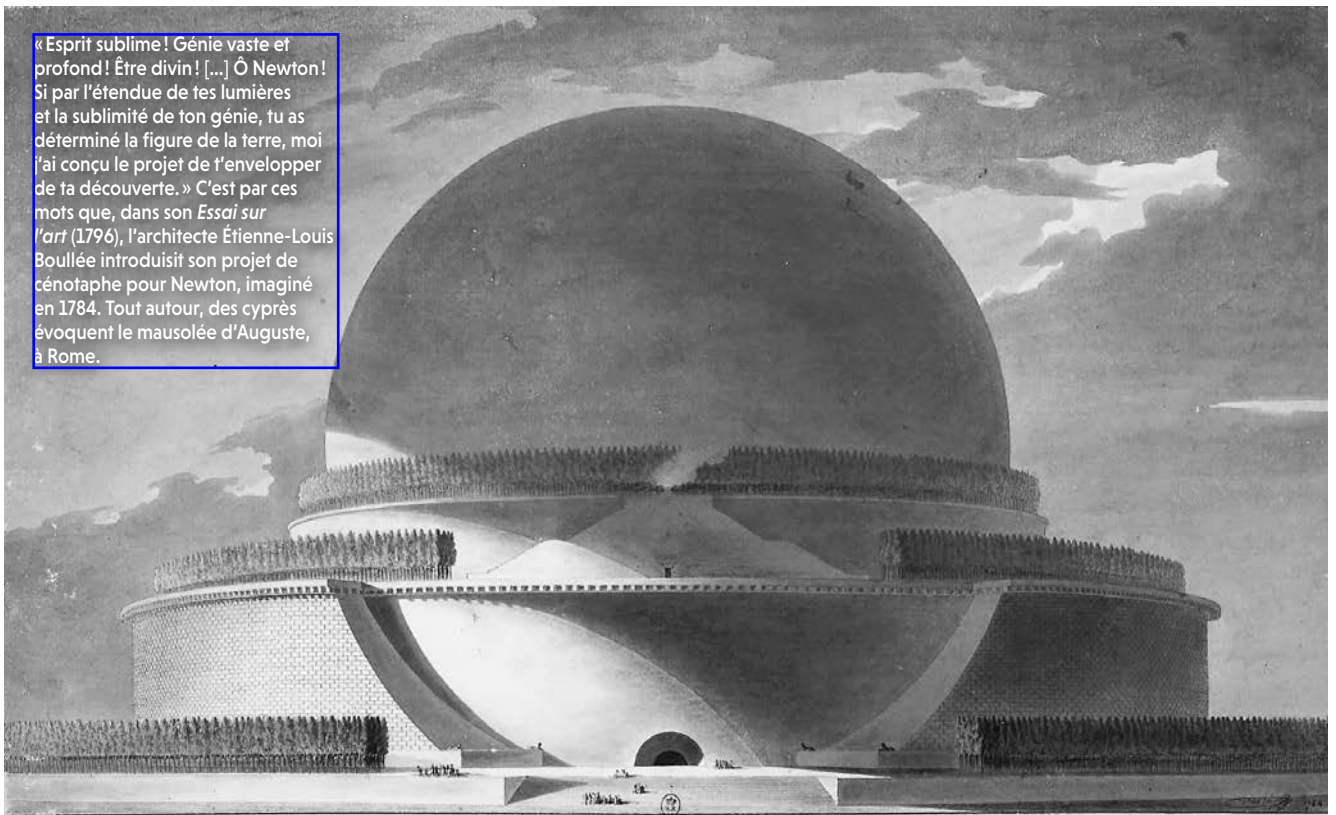
profondes et continuelles pendant la force de l'âge, occupé ensuite d'une Charge importante». Un homme trop élevé et trop occupé pour tomber dans les bassesses de la chair.

Enfin, la description de l'agonie de Newton le rapproche clairement de la figure du martyr: «Dans des accès de douleur si violents que les gouttes de sueur lui en couloient sur le visage, il ne poussa jamais un cri, ni ne donna aucun signe d'impatience, & dès qu'il avoit quelques moments de relâche, il sourioit, & parloit avec sa gayeté ordinaire.»

Reprise entre autres par Voltaire, la légende sera colportée durant tout le XVIII^e siècle. Enterré à l'abbaye de Westminster au côté des rois, Newton sera célébré comme un demi-dieu de la science et un génie universel. Il faudra attendre Einstein pour voir un autre scientifique à ce point célébré. La légende, cependant, ne survivra pas aux faits et, dès le XIX^e siècle, un portrait bien moins flatteur apparaîtra. Si bien qu'aujourd'hui, l'éloge écrit par Fontenelle prête à sourire.

Affable, Newton? Bien peu s'en faut. S'il était occasionnellement capable de douceur, il

« Esprit sublime ! Génie vaste et profond ! Être divin ! [...] Ô Newton ! Si par l'étendue de tes lumières et la sublimité de ton génie, tu as déterminé la figure de la terre, moi j'ai conçu le projet de t'envelopper de ta découverte. » C'est par ces mots que, dans son *Essai sur l'art* (1796), l'architecte Étienne-Louis Boullée introduisit son projet de cénotaphe pour Newton, imaginé en 1784. Tout autour, des cyprès évoquent le mausolée d'Auguste, à Rome.



➤ était surtout connu pour sa paranoïa et, même au dire de ses amis, pour ses accès de fureur face à quiconque susceptible de menacer ses idées, son honneur ou sa position sociale.

John Flamsteed, astronome royal membre de la Royal Society, en fit les frais. En effet, Newton avait besoin d'observations précises de la Lune pour développer sa théorie du mouvement de ce satellite, problème immensément complexe et tout juste ébauché dans son œuvre magistrale de 1687, les *Principia Mathematica*. Il se tourna alors vers Flamsteed qui avait entrepris l'œuvre immense de cataloguer les positions de toutes les étoiles visibles. La position de la Lune était aussi dans ses projets et sa précision dépendait de celle des étoiles. Dans les années 1690, il fournit 150 observations de la Lune au célèbre savant, en échange de la promesse de Newton de lui donner la primauté de ses résultats et de ne pas divulguer ses observations à autrui. Il craignait de voir son travail incomplet divulgué prématurément, et sa réputation ternie.

Mais Newton ne le considéra jamais comme un égal. Non content de ne jamais citer la contribution de Flamsteed à ses collègues, il lui reprocha même d'être à l'origine de son propre échec de mettre sur pied une théorie quantitative de la Lune, à cause du trop peu d'observations fournies. À partir de 1704, devenu le tout puissant président de la Royal Society, Newton manœuvra pour forcer Flamsteed à remettre son catalogue incomplet, sous scellé, puis en 1708 ses

Newton avait l'oreille des princes et s'est révélé un homme de pouvoir manipulateur

observations de 1689 à 1705 devant une commission que lui-même dirigeait. En 1710, il obtint de la reine Anne un édit obligeant Flamsteed à donner annuellement toutes ses observations de l'année écoulée, prétextant que le catalogue était essentiel à l'amélioration de la navigation. Puis il évinça Flamsteed des corrections de ses propres tables, propulsant Edmond Halley, ennemi intime de l'astronome royal, responsable de la publication.

Toute l'affaire trouva son acmé dans une réunion houleuse en octobre 1711 à la Royal Society où Newton exigea, en échange de la réparation des instruments de l'observatoire (possessions de Flamsteed) que ces derniers

deviennent propriété de l'institution. Flamsteed refusa, accusant l'institution de lui voler l'œuvre de toute une vie. Newton, selon Flamsteed, entra alors dans une fureur terrible, l'invectivant de tous les noms, dont blanc-bec («puppy») fut le moins offensant. Peu après, le catalogue pirate édité par Halley fut imprimé. Bourré d'erreurs, c'était un crève-cœur pour Flamsteed, qui acheta pour une fortune 300 des 400 exemplaires imprimés et les jeta aux flammes. Après sa mort en 1719, son ennemi Halley prit sa place à l'observatoire. Le catalogue original de Flamsteed ne fut publié qu'en 1725 par son assistant. Il contenait la position de 3000 étoiles avec une précision inégalée.

Evidemment, Flamsteed n'est pas exempt de reproches dans sa relation avec le président de la Royal Society, mais on pourra juger à quel point Newton était «toujours de niveau avec tout le monde». Tout comme on en jugera aussi par sa querelle de priorité avec son confrère allemand Gottfried Leibniz à propos de l'invention du calcul infinitésimal. Leibniz demanda, un peu naïvement, qu'une commission se prononce sur le sujet, ce qui donna l'occasion à Newton de la nommer lui-même. La commission conclut non seulement que Newton était le premier inventeur – ce sur quoi les historiens s'accordent aujourd'hui –, mais, en outre, suggéra que Leibniz avait dérobé son invention à Newton – ce que les historiens ont démenti.

Quant au désintéressement supposé d'un homme trop occupé de ses travaux, il est à examiner au regard de sa carrière politique: Newton s'est élevé jusqu'aux plus hautes charges de l'État, maître de la Monnaie, membre du Parlement et bien sûr président de la Royal Society. Il avait l'oreille des princes et s'est révélé un homme de pouvoir, manipulateur, irascible et plaçant ses créatures à tous les postes possibles.

FASCINÉ PAR L'OCCULTE

S'il n'y avait que cela, Newton resterait tout de même le père de la raison, titre qu'il partage avec Galilée. Newton est bien sûr un esprit perspicace, créatif et même obsessionnel, poursuivant un problème des années durant jusqu'à trouver une solution satisfaisante. Mais loin d'œuvrer dans l'empire froid du calcul rationnel, Newton était porté par un soubassement idéologique profondément ésotérique. C'est pour chercher Dieu qu'il s'est lancé dans ses travaux de mécanique céleste, mais aussi d'alchimie, sans y voir la moindre contradiction. Comprendre le mouvement des planètes ou chercher le secret de la pierre philosophale et de l'élixir de jeunesse participent pour Newton de la même logique: Dieu a scellé l'Univers dans un code qu'il s'agit de déchiffrer.

Conscient des répercussions sur sa réputation que de telles activités pouvaient avoir, il

CHOISI PAR DIEU POUR RÉTABLIR LA VRAIE RELIGION

A ses propres yeux, Newton avait été choisi par Dieu pour rétablir la vraie religion.

Il accompagnerait le Christ dans son règne de mille ans à la fin des temps. En toute simplicité.

Il s'inscrivait en effet dans une tradition de la Renaissance néoflorentine, la *prisca sapientia*, consistant à penser que les civilisations antiques s'étaient élevées à un état de connaissances par la suite dégradé ou perdu. Le thème était classique en mathématiques, en astronomie ou en architecture, et Copernic et Kepler s'étaient ainsi réclamés d'une tradition héliocentrique de certains Grecs. Newton se place dans cette veine, mais la pousse à son paroxysme.

Il croit en l'existence, depuis Noé jusqu'à Pythagore, d'une seule et même religion originelle (non trinitaire) couplée à la connaissance du vrai système du monde, perdue depuis. Une connaissance si parfaite que les Anciens avaient déjà découvert le principe (newtonien) de la gravitation

universelle, affirme-t-il en 1692 à l'astronome suisse Nicolas Fatio de Duillier. Dans une œuvre intitulée *The Original of Religions*, Newton affirme que des peuples anciens aussi divers que les Égyptiens, les Grecs, les Chinois, les Indiens, les Hébreux, les Danois, les Latins avaient en réalité les mêmes pratiques religieuses et que Stonehenge était l'un des anciens temples de la vraie religion. Par ailleurs, pour lui, les dieux antiques étaient des personnages réels qui avaient été sacrifiés après leur mort.

Ces deux idées lui permettaient d'affirmer que derrière la pluralité des noms des dieux, des événements et des langues se cachaient les mêmes personnages et les mêmes conceptions. Une étude attentive des textes anciens tels que les œuvres attribuées à Hermès Trismégiste, personnage mythique de l'Antiquité gréco-égyptienne et supposé n'être autre que le dieu Toth, pouvait donner des indices du système du monde, textes que Newton utilisait précisément dans ses recherches alchimiques.

Ainsi, dans ses œuvres tant théologique que mathématique, Newton ne faisait selon lui que retrouver les arcanes originelles de la vraie religion qui incluait Moïse et Jésus-Christ lui-même, connue des Chaldéens et de tous les peuples de la Terre avant le Messie. À ses yeux, les anciens naturalistes étaient des prêtres dans leurs cultures respectives, explique l'historien britannique Rob Iliffe en 2016 dans son ouvrage *Oxford Companion to Newton*, et le philosophe naturel moderne, qui décodait l'œuvre de Dieu, s'engageait dans une quête intrinsèquement religieuse.

Y. F.

cacha ses recherches alchimiques à presque tout le monde, mais composa quantité de notes qui nous sont parvenues aujourd'hui. L'économiste britannique John Maynard Keynes en découvrit toute l'étendue dans les papiers de Newton qu'il racheta en 1936. Fasciné, il écrivit en 1946 un texte que son décès l'empêcha de lire lors de la célébration du tricentenaire de la mort du savant anglais (repoussé du fait de la guerre):

«Newton n'était pas le premier de l'âge de la raison. Il était le dernier des magiciens, le dernier des Babyloniens et des Sumériens [...]. Ses instincts les plus profonds étaient occultes, ésotériques, sémantiques – reculant face au monde, paralysé par la peur d'exposer ses pensées, ses croyances, ses découvertes en toute nudité à l'inspection et à la critique du monde. [...] Par

la pensée pure, par la concentration de l'esprit, l'énigme, croyait-il, serait révélée à l'initié.»

Keynes ne pense pas seulement à ses travaux alchimiques lorsqu'il le qualifie de dernier des Sumériens. En effet, probablement au début des années 1670, Newton devint antitrinitaire, une doctrine récusant que Jésus-Christ soit de même nature que Dieu, même si ce dernier lui avait attribué des pouvoirs divins. Il souscrivit à l'idée que la religion chrétienne avait été corrompue au IV^e siècle par les pères de l'Église, aidés à la fois des hommes de religion et des empereurs d'alors. Poursuivant une tradition exégétique protestante, Newton réinterpréta l'Apocalypse comme la prophétie symbolique d'événements historiques ou à venir: ainsi, l'édit de Thessalonique de 380 par Théodose 1^{er} faisant du christianisme nicéen (trinitaire) une religion d'État correspondrait à l'ouverture du septième sceau, moment charnière ouvrant sur la seconde série de

Tout concourt à faire des savants les héros fictifs de l'épopée du progrès

cataclysmes symbolisée par les sept trompettes. Newton va encore plus loin et considère que les hordes de Goths culminant dans le sac de Rome de 410 ont été envoyées par Dieu pour combattre l'hérésie trinitaire. Il vit dans un monde mental où le Bien et le Mal se livrent une lutte réelle et contemporaine, précédant la seconde venue du Christ, qui selon lui n'advient pas avant 2060...

Voilà qui était Newton. Un esprit extraordinaire par sa persévérance et son inventivité. Un être ésotérique à la charnière entre les traditions mourantes de la Renaissance et l'avènement de la science moderne. Un mégalomane manipulateur en quête de pouvoir. Dans tous les cas, un esprit original. Mais pas le saint que l'on s'est plu à décrire et tel qu'on se l'imagine encore dans le grand public même après un siècle de révélations.

ICÔNES DÉCHUES

L'exercice se renouvelle à l'envi. Après la sécularisation des valeurs associées à la science, qui se détache de la religion avec les Lumières, on retrouve encore la figure du saint génie, pour d'autres raisons. Ainsi en va-t-il de Pasteur, héros de la République qui, par exemple, inocula la rage au petit Joseph Meister pour vérifier si le vaccin précédemment administré avait réellement fonctionné, sachant qu'il ne l'avait encore jamais testé avec succès sur un humain. Meister ne développa pas de symptômes et Pasteur fut célébré. On jugera de la bienveillance de telles méthodes.

Citons encore Le Verrier, découvreur de Neptune en 1846, célébré comme génie national, mais bouffi d'ambition politique et intraitable autocrate de l'Observatoire de Paris, dont la quasi-totalité du personnel le haïssait. Ou Richard Feynman, Prix Nobel de physique et icône de la physique de la seconde moitié du XX^e siècle, dont on découvrit la misogynie. Que penser aussi de James Watson, qui révolutionna la biologie par sa découverte de la structure en hélice de l'ADN, Prix Nobel de médecine 1962, dont les thèses racistes firent la une du *Sunday Times* en 2007? Et Werner Heisenberg, qui s'accommoda du pouvoir nazi et participa aux recherches nucléaires de l'Allemagne



En 1885, Louis Pasteur guérit Joseph Meister de la rage en le «vaccinant», c'est-à-dire en lui inoculant de la moelle de lapin mort rabique de plus en plus récente. La dernière inoculation, faite avec de la moelle fraîche et donc porteuse de la rage, n'était en fait pas nécessaire pour le guérir. Pasteur la pratiqua pour montrer que son vaccin empêchait une nouvelle infection...

hitlérienne, quoique de manière controversée, tandis que ses collègues fuyaient l'Europe?

Aujourd'hui comme hier, les milieux de la recherche se structurent autant que les autres sur leur temps. Conservatoires de haines recuites ou incubateurs de mondes nouveaux, s'y retrouvent ambitieux et indifférents, médiocres et compétents, égotiques et modestes. Aujourd'hui comme hier, le mythe du saint scientifique ne tient pas.

LE BESOIN DE HÉROS

On a vu les origines de ce mythe. La figure du savant devenant locuteur du vrai, puis guide de la société en complément voire concurrence du prêtre. Sa légitimation accentuée par des États déterminés à utiliser la science pour accroître leur puissance aux XVII^e et XVIII^e siècles. Le besoin des États-nations du XIX^e siècle de personnifier le génie national. Tout concourt à laisser de côté l'humanité des scientifiques pour en faire les héros fictifs de l'épopée du progrès menant la société vers sa perfection.

Trois siècles de ce régime ont contribué à créer une catégorie culturelle où les chercheurs de vérité sont confondus sous la catégorie du Bien, au-delà des évidences de leur nature

humaine. Cette catégorie persiste encore aujourd'hui aux yeux du grand public et des institutions politiques à travers la méconnaissance absolue du fonctionnement réel de la science. Combien croient qu'elle advient par les coups de génie d'une poignée de héros alors qu'elle est le fruit de la critique des résultats, de la répétition des expériences et de la lente constitution des théories par une armée de scribes? En ce sens, les Prix Nobel sont une survivance ne correspondant en rien à la manière dont se produit la science depuis longtemps.

Il y a plus. Si l'on élargit encore le cadre, ces figures de la science sont en fait l'expression de notre besoin anthropologique de héros. Elles sont le culte des ancêtres des sociétés modernes occidentales, auquel on voue statues, célébrations et rappels des faits glorieux. Elles sont aussi l'expression d'une hiérarchie sociale ancienne célébrant la pensée au détriment de la main. Elles sont enfin les personifications de nos valeurs sociales et des modèles de vie, sur lesquels planent les ombres du sacrifice chrétien et du labeur silencieux. Et face aux faits, nous sommes choqués comme des petits enfants découvrant que leurs parents ne sont pas les êtres parfaits qu'ils s'imaginent. ■

BIBLIOGRAPHIE

Z. Rosenkranz (éd.), **The Travel Diaries of Albert Einstein, The Far East, Palestine, and Spain, 1922-1923**, Princeton University Press, 2018. (La version de 2012 est disponible sur le site : einsteinpapers.press.princeton.edu/vol13-trans/326)

R. Iliffe, **The religion of Isaac Newton**, dans R. Iliffe et G. E. Smith (éds.), **The Cambridge Companion to Newton**, Cambridge University Press, pp. 485-523, 2016.

R. Iliffe, **Newton : A Very Short Introduction**, Oxford University Press, 2007.

S. Shapin, **La Révolution scientifique**, Flammarion, 1998.

LES {Partagez les savoirs}
RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

Entrée gratuite

Au Jardin des Plantes

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

POUR LA SCIENCE

PROJECTION / DÉBAT CYCLE INTERACTIONS HOMMES / ENVIRONNEMENT

Samedi 29 septembre – 15h : Les imaginaires de l'effondrement
Projection de « Planet Σ » de Momoko Seto (France, 2014, 10')

Il y a 2,2 milliards d'années, la Terre était en pleins bouleversements : le froid cohabitait avec le chaud, l'accélération avec le ralenti, le géant avec le microscopique...

Suivie d'un débat avec :
Jean-Baptiste Fressoz, historien des sciences, des techniques et de l'environnement, Centre Alexandre Koyré : *Les ruines du futur : l'imaginaire de l'effondrement du XVII^e à nos jours*.
Mélanie Pavy, artiste et doctorante dans le cadre du programme SACRe/PSL : *Regards documentaires sur l'Apocalypse*.
Gabriel Bortzmeyer, historien du cinéma, enseignant à Paris 8 : *Cinéma d'animation et crises écologiques*.

LES MÉTIERS DU MUSÉUM

Dimanche 30 septembre – 15h : Soigneur de squelettes
Julien Barbier

Le soigneur d'os est un métier de terrain, réparant les dégâts du temps, des visiteurs, de la poussière... sur les spécimens de la galerie. Chaque intervention demande une méthode et des moyens différents. Aucune journée ne se ressemble pour soigner les résidents de la Galerie de Paléontologie et d'Anatomie comparée.

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



U N



N E M E U R T

J A M A I S .

EN TRIANT VOS JOURNAUX,
MAGAZINES, CARNETS, ENVELOPPES,
PROSPECTUS ET TOUS VOS AUTRES
PAPIERS, VOUS AGISSEZ POUR UN MONDE
PLUS DURABLE. DONNONS ENSEMBLE
UNE NOUVELLE VIE À NOS PRODUITS.

[CONSIGNESDETRI.FR](https://consignesdetri.fr)

CITEO

Le nouveau nom d'Eco-Emballages et Ecofolio

La DAM, des experts scientifiques pour la défense et la sécurité nationales

La Direction des applications militaires du CEA, la DAM, qui célèbre cette année ses 60 ans, conçoit des armes nucléaires sûres et efficaces au service de la dissuasion nucléaire française. Une mission qui repose aujourd'hui

sur la simulation et les calculs intensifs.

« **D**epuis plus de cinquante ans, la dissuasion [nucléaire] est la clé de voûte de notre stratégie de défense », a déclaré Emmanuel Macron le 23 janvier dernier. Autrement dit, depuis les années 1960, pour protéger le territoire et ses habitants, la dissuasion nucléaire française repose sur une doctrine défensive pour éviter la guerre. En montrant au monde entier qu'elle maîtrise les technologies nucléaires appliquées à la défense, la France cherche à dissuader d'autres États d'attenter à ses intérêts vitaux, notamment par l'utilisation de l'arme atomique.

UN TRAITÉ INTERDISANT LES ESSAIS NUCLÉAIRES

La crédibilité de la dissuasion repose sur la capacité scientifique et technique de la France à concevoir et à garantir le fonctionnement et la sûreté de ses armes nucléaires. C'est la mission de la DAM, la Direction des applications militaires, créée en 1958 au CEA, le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (institué officiellement par le général de Gaulle en 1945). Pour remplir ces objectifs, la DAM emploie aujourd'hui environ 4500 personnes – chercheurs, ingénieurs, techniciens, gestionnaires, secrétaires, agents de sécurité... –, qui disposent « des technologies et des compétences scientifiques parmi les meilleures du monde », rappelle François Geleznikoff, directeur de la DAM depuis 2015.

La dissuasion nucléaire française repose d'abord sur les armes nucléaires proprement dites, c'est-à-dire les têtes nucléaires. Mais aussi >

> sur des vecteurs efficaces, missiles, avions et sous-marins à propulsion nucléaire. Ces derniers sillonnent toutes les mers du globe, indétectables mais prêts à riposter si nécessaire. La sécurité de la France passe aussi par la lutte contre la prolifération nucléaire. Il s'agit en particulier de surveiller que tous les pays signataires du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires (Tice) le respectent bien... Car, depuis 1996, la France et les autres nations ayant ratifié le Tice se sont engagées à ne plus réaliser de tels essais.

Ce traité international a par ailleurs littéralement révolutionné la DAM dans sa façon de travailler et de remplir sa mission: ne pouvant plus se fonder sur les essais nucléaires pour mettre au point les armes tout en garantissant leur fiabilité et leur sûreté, la DAM a lancé, il y a un peu plus de vingt ans, le programme Simulation. Au départ, pour concevoir la charge nucléaire, la partie de l'arme qui délivre l'énergie. Bien sûr, sans essai nucléaire réel, assurer son fonctionnement et sa sûreté prend une

pour être résolues sur un ordinateur très puissant. Il consiste d'autre part à tester les prévisions de chaque phénomène modélisé par des expériences en laboratoire. Par exemple, on vérifie le comportement de matériaux sous très haute pression dans un dispositif nommé «cellule enclume diamant». Les expériences, contrairement aux essais réels, ne testent pas le fonctionnement complet d'une charge nucléaire, mais des étapes, des parties. Les modélisations numériques de ces étapes sont mises bout à bout dans un code de calcul pour simuler le fonctionnement complet.

La DAM dispose du calculateur le plus puissant en France, le 14^e mondial

Comme la simulation repose sur d'énormes calculs, depuis plus de vingt ans, la DAM s'est dotée des machines parmi les plus performantes du monde grâce à une démarche de codesign avec Bull (aujourd'hui au sein d'Atos). Le site de Bruyères-le-Châtel abrite ainsi la machine Tera-1000, le plus puissant calculateur en France, le quatorzième au niveau mondial en termes de performance. Yoccoz – c'est son surnom – dispose d'une puissance maximale de 25 petaflops, c'est-à-dire qu'il peut réaliser 25 millions de milliards d'opérations par seconde.

Mais toute la puissance de calcul n'est pas réservée à la dissuasion! Dans le Très grand centre de calcul de la DAM, le TGCC, où se trouvent d'autres supercalculateurs, elle est mise à disposition de la communauté scientifique académique, ainsi que des entreprises privées. Une quarantaine de partenaires industriels s'appuient ainsi sur les moyens de calcul du TGCC. De nombreux secteurs de l'industrie sont impliqués: aéronautique et spatial, automobile, énergie, pour n'en citer que quelques-uns, mais aussi le groupe L'Oréal, qui utilise le calcul intensif pour la conception de cosmétiques.



LE SUPERCALCULATEUR TERA-1000

peut réaliser jusqu'à 25 millions de milliards
d'opérations par seconde.

autre tournure. Daniel Bouche, directeur de recherche à la DAM, l'explique bien: «Avant, on construisait des armes totalement optimisées en termes de masse et d'encombrement parce qu'on les testait en réel. C'était un travail d'orfèvre. Maintenant, on conçoit des armes plus «robustes», dont on garantit le fonctionnement et la sûreté par la simulation. En somme, on est passé de la conception de «Formule 1» au développement de véhicules tout-terrain optimisés.»

Plus précisément, le programme Simulation consiste d'une part à modéliser les phénomènes physiques par des équations mathématiques, puis à traduire ces dernières en langage numérique («code»)

Les expériences de physique permettent de valider ces modélisations. «Le code, qui traduit en langage informatique les formules mathématiques de la modélisation, n'est qu'un intégrateur que des physiciens, avec leur expertise et les résultats des expériences, utilisent pour concevoir et garantir l'arme... ajoute Laurence Bonnet, directrice scientifique de la DAM. L'ingénierie des armes et les savoir-faire acquis à la DAM depuis de nombreuses années sont primordiaux. De plus, nous utilisons notre «trésor de guerre», à savoir les données issues des anciens essais nucléaires, sans lesquelles nous ne pourrions pas valider globalement les simulations et garantir la sûreté et la fiabilité des armes.»

DES ARMES INVISIBLES AUX RADARS

A la DAM, le programme Simulation s'est aussi étendu à toutes les fonctions de la tête nucléaire, pour la conception et l'assemblage des matériaux qui la composent, pour sa précision, pour sa rentrée dans l'atmosphère... Et pour sa furtivité, un atout essentiel: «Une arme, précise Daniel Bouche, doit être capable de remplir sa mission quelle que soit l'évolution des défenses adverses, et ainsi ne doit pas être détectée puis détruite en plein vol. Elle doit donc être furtive, c'est-à-dire invisible aux radars, sinon la crédibilité de la dissuasion s'effondrerait!» Pour atteindre cet objectif, «la DAM a considérablement amélioré son programme Simulation pour la furtivité, et c'était un défi qui, à l'époque, sortait largement des sentiers battus de la science», précise avec fierté François

Geleznikoff. Aujourd'hui, la furtivité est un des domaines de la DAM (avec la conception de la charge nucléaire et des matériaux) qui nécessite le plus de simulations, et donc le plus de calculs intensifs.

Comme l'objectif est de faire en sorte que les armes nucléaires françaises soient invisibles aux radars, les codes de calcul modélisent l'interaction des ondes électromagnétiques (émises par les radars) avec les matériaux constituant les couches externes de la tête nucléaire.

«Plusieurs étapes sont ainsi nécessaires à la conception d'une arme furtive, explique Paula Aguilera, jeune ingénieure-chercheuse. D'abord, j'estime tous les phénomènes physiques ou toutes les contraintes, par exemple thermomécaniques, qui entrent en jeu, puis je les modélise «un par un» et lance les calculs sur des ordinateurs de bureau, qui n'ont alors pas besoin de réaliser trop d'opérations à la seconde.» S'ensuit la phase de faisabilité où chaque modèle est testé expérimentalement avec des maquettes, et ensuite la phase de «définition», où le code complet du matériau en entier est précisément calculé. Et c'est à ce moment-là qu'il est nécessaire de disposer d'un ordinateur puissant: Paula Aguilera et ses collègues travaillent avec la machine Tera-1000. Enfin, si le résultat de la simulation démontre que la tête est bien furtive, le matériau est produit à l'aide de procédés de fabrication adaptés.

DES APPLICATIONS CIVILES ISSUES DE LA MISSION DÉFENSE

La production d'armes nucléaires sûres et fiables est une mission de la DAM, mais ce n'est pas la seule. Il s'agit aussi, comme on l'a vu, de lutter contre la prolifération nucléaire. Pour remplir cette mission, certains scientifiques «cherchent une aiguille dans une botte de foin», c'est-à-dire qu'ils recherchent des traces de matériaux entrant dans la composition des armes nucléaires sur des sites où l'on soupçonne par exemple une activité clandestine (voir l'encadré ci-contre). D'autres surveillent le globe en permanence... L'objectif: détecter les ondes engendrées

À LA RECHERCHE D'INDICES DE PRÉSENCE NUCLÉAIRE

Depuis plus de vingt ans, la DAM participe activement à la lutte contre la prolifération nucléaire, notamment en développant de nouveaux moyens de détection chimique. Ainsi, certaines de ces techniques de pointe sont régulièrement mises en œuvre en soutien à l'Agence internationale de l'énergie atomique (IAEA), dont le siège se situe à Vienne, en Autriche. L'IAEA a pour mission de vérifier et contrôler l'application des accords de garanties de non-prolifération nucléaire établis avec les États membres signataires du Traité de non-prolifération (TNP). Dans ce cadre, les inspecteurs de l'IAEA réalisent des prélèvements de particules micrométriques en frottant la surface de matériels ou de murs avec des échantillons en coton appelés «frottis». Les caractérisations moléculaires et isotopiques de ces particules microscopiques constituent des indices permettant d'identifier une installation industrielle suspecte et d'en préciser les activités. Puis les frottis sont envoyés à l'un ou l'autre de la dizaine de laboratoires hautement spécialisés sur lesquels s'appuie l'IAEA et dont fait partie le laboratoire d'expertise analytique de la DAM. Ce dernier réalise deux catégories d'expertise à partir des frottis. Les premières ont pour objectif de rechercher et mesurer des «observables» inorganiques comme la composition isotopique et la forme physicochimique des particules d'uranium, qui sont des indices précieux pour identifier



MAXIME BRIDOUX

le procédé mis en œuvre. Les secondes permettent de détecter des traces infimes de molécules organiques, spécialité de Maxime Bridoux, ingénieur-chercheur au CEA depuis 2012 et expert en analyse moléculaire. Ainsi, Maxime Bridoux traque des substances intervenant dans la fabrication des armes nucléaires, comme des explosifs, des polymères, des additifs, des diluants... «Dans un laboratoire de chimie organique classique, les molécules d'un échantillon, comme le frottis, sont extraites à l'aide de solvants, puis injectées en tête de colonne chromatographique pour être séparées et analysées par spectrométrie de masse, explique Maxime Bridoux. Mais nous, pour identifier directement les substances à la surface du frottis, nous développons des méthodes

innovantes qui permettent «d'ioniser» les molécules directement à la surface des frottis, sans séparation chromatographique ni utilisation de solvants. Nous cherchons donc des indices directement à la surface de n'importe quel solide, en quelques minutes, et détectons des quantités infimes, de l'ordre du nanogramme (milliardième de gramme).» Maxime Bridoux et ses collègues collaborent également avec le Laboratoire central de la préfecture de police de Paris, notamment pour identifier des explosifs après des attentats par exemple. Car la signature isotopique des composants des explosifs permet de déterminer l'origine de l'engin explosif et parfois de remonter les filières.

par des explosions nucléaires. Et là encore, il s'agit de trouver le bon signal au milieu d'un bruit de fond ambiant très intense.

Hélène Hébert travaille à la DAM à la détection de ces ondes, mais pour une autre application importante: l'alerte sismique et la prévision des tsunamis. Car dans le bruit de fond terrestre, se trouvent les ondes émises par les tremblements de terre (voir l'encadré page suivante). C'est donc pour les besoins de la dissuasion que sont disposés partout sur le globe des

détecteurs d'ondes, adaptés au type de signal que l'on cherche à capter: un sismographe est d'autant plus grand qu'il mesure un signal basse fréquence. Même le grand public participe: une hausse du trafic sur le site Web du Centre sismique euro-méditerranéen ou du nombre de tweets contenant le mot séisme sont des indicateurs utiles. Et, dans quelques années, chacun pourra transmettre au réseau de surveillance terrestre les données de son sismographe personnel. Tout cela, afin de mieux

LA DAM DU CEA EN CINQ DATES

1945

Naissance du CEA, le Commissariat à l'énergie atomique.

1958

Création de la DAM, la Direction des applications militaires, du pôle défense du CEA.

1996

Traité d'interdiction complète des essais nucléaires, le Tice, puis début du programme Simulation à la DAM.

2001

Installation du premier supercalculateur Tera-1 tournant à 5 téraflops.

2022

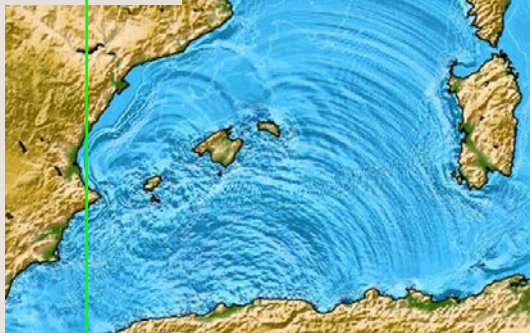
Acquisition d'un calculateur de plusieurs centaines de pétaflops.

TSUNAMIS SANS FRONTIÈRES

« **U**n tsunami n'a pas de frontières... Et en 2004, à Sumatra, le monde entier en prend

brutalement conscience. La simulation permet de prévoir de mieux en mieux les effets des séismes et donc définir les zones à évacuer mais, à cette période, cela concernait essentiellement le Pacifique. Le grand tsunami de l'Océan Indien, extrêmement destructeur, n'a pas du tout été anticipé, car il n'y avait absolument aucun système de prévention ni d'alerte dans cette région du monde. Très vite, à partir de 2005, les autorités nationales et internationales équipent alors de systèmes d'alerte tous les océans et les régions potentiellement exposés aux tsunamis », explique Hélène Hébert, experte tsunami à la DAM. En effet, la DAM a pour mission de détecter d'éventuelles explosions nucléaires, en isolant les ondes qu'elles émettent d'un bruit de fond terrestre intense. De sorte qu'une activité de protection civile est née de cette surveillance : la traque des séismes et l'évaluation de leurs effets potentiellement dévastateurs, comme les tsunamis. Cette observation et ces prévisions ont débuté dans le Pacifique dans les années 1960-1970. Mais après la catastrophe de Sumatra, naît à la DAM le Cenalt, le Centre national d'alerte aux tsunamis, où se trouve le laboratoire d'Hélène Hébert, sur le site de Bruyères-Châtel (en Essonne). Loin de la mer, ce centre surveille les séismes, évalue les variations des niveaux de la mer, et est responsable de l'alerte tsunami pour les côtes françaises métropolitaines. « Bien sûr, en Europe occidentale, le contexte n'est pas le même que dans le Pacifique et le risque de vagues dévastatrices bien moins grand, précise l'experte de la DAM. Mais l'histoire nous rappelle que des événements rares ne sont pas pour autant impossibles : en 1755, le séisme

TSUNAMI DU AU SÉISME D'ALGER EN 2003



de Lisbonne, de magnitude certainement supérieure à 8, a produit un tsunami proche de celui de Sumatra, avec

5 mètres de vagues sur les Antilles françaises et des déferlantes moins importantes en Irlande, en Angleterre et probablement en France. Or les côtes étaient peu occupées à l'époque. Imaginez les dégâts humains et matériels qu'il y aurait aujourd'hui... ». Au quotidien,



HÉLÈNE HÉBERT

le Cenalt surveille en permanence, 7 jours sur 7, 24 heures sur 24, les ondes sismiques en Europe, notamment au large de Lisbonne, de l'Algérie et de Nice où se situent des zones sismiques. Et il échange ces données et savoir-faire avec tous les autres centres de prévention des pays voisins. Si un séisme se produit, le Cenalt envoie un message d'alerte en moins de 15 minutes avec les caractéristiques du séisme et les heures d'arrivée estimées du tsunami sur la côte. Une « matrice de décision » a été définie par les services de sécurité civile pour classer les tsunamis en catégorie rouge (risque d'inondation), orange (impact sur la côte) ou jaune (pas d'impact notable). Cette matrice permet de définir rapidement la dangerosité de l'événement en cours. La sécurité civile a alors moins d'une heure (par exemple si le séisme a lieu en Algérie) pour mettre à l'abri les populations.

Une autre réalisation grand public développée au départ pour la dissuasion par les scientifiques de la DAM (en collaboration avec la Direction des recherches technologiques du CEA) est l'électronique « durcie », c'est-à-dire qui résiste à tout type de rayonnements ou de perturbations électromagnétiques... Par exemple, des armes nucléaires pourraient être utilisées pour détruire les têtes nucléaires françaises sur leur trajectoire. Ces armes émettraient en effet des rayonnements, sous forme de photons ou de neutrons, susceptibles d'endommager l'électronique ou de compromettre le fonctionnement de la tête nucléaire. C'est pourquoi la France a conçu des composants électroniques résistants aux rayonnements. Cette électronique dite SoI – pour *Silicon on insulator*, silicium sur isolant – développée par la société Soitec, se retrouve partout : dans les téléphones portables, les satellites soumis au rayonnement solaire, les voitures...

UNE SCIENCE DE POINTE

Bien entendu, pour des raisons de secret-défense, les scientifiques de la DAM ne publient pas tous leurs travaux de recherche... D'autres États pourraient utiliser ces résultats pour développer leur armement nucléaire. Toutefois, les équipes de la DAM publient environ 400 articles scientifiques par an dans des revues à comité de lecture. « Depuis que nous ne pouvons plus faire d'essais nucléaires, le fait de publier certains de nos travaux, explique François Geleznikoff, est une bonne façon de montrer que nous sommes scientifiquement et techniquement au meilleur niveau mondial dans le domaine des armes nucléaires. Ce qui rend la dissuasion crédible. » D'autant que la DAM ne compte pas s'arrêter là. Les progrès en simulation sont réguliers. Aujourd'hui, on ne connaît pas encore parfaitement les forces d'interaction du noyau, qui pourtant sont essentielles pour comprendre et contrôler au mieux la fusion et la fission nucléaires. Mais avec l'augmentation de la puissance de calcul, les ingénieurs espèrent simuler des « objets » de plus en plus volumineux, tout comme ils simuleront avec une précision accrue le noyau. En effet, dans moins de cinq ans, les ordinateurs de technologie Bull de la DAM devraient atteindre, voire dépasser, quelques centaines de petaflops, comme la machine Summit récemment présentée par l'industrie des États-Unis. Un nouveau seuil dans la précision et le réalisme des simulations sera ainsi franchi. ■

> déterminer le lieu, la puissance et les conséquences d'un séisme : une forme de science participative.

D'autres dispositifs scientifiques de la DAM, aussi développés pour les besoins de la dissuasion, trouvent des applications civiles, dans la recherche académique et industrielle. C'est le cas par exemple du laser Mégajoule, conçu pour étudier, à très petite échelle, le comportement des matériaux dans des conditions extrêmes de

température et de pression, semblables à celles atteintes lors du fonctionnement nucléaire des armes. Mais ce dispositif a aussi considérablement musclé la filière optique, notamment pour le développement des traitements antireflets des verres, et est utilisé pour des expériences en astrophysique. « Un quart du temps d'utilisation du laser Mégajoule, précise François Geleznikoff, est dédié à la communauté scientifique internationale. »

Retrouvez l'ouvrage des 60 ans de la DAM
<http://www-dam.cea.fr/dam/#PubliScience>

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

OFFRE RENTRÉE

DURÉE LIBRE

3 FORMULES
AU CHOIX

	FORMULE PAPIER	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier (12 numéros par an)	✓	✓	✓
Le hors-série papier (4 numéros par an)		✓	✓
L'accès en ligne illimité www.pourlascience.fr			✓
L'édition numérique du magazine (12 numéros par an)			✓
L'édition numérique du hors-série (4 numéros par an)			✓
L'accès aux archives numériques depuis 1996			✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	4,90€ PAR MOIS	5,75€ PAR MOIS	7,40€ PAR MOIS

29 %
de réduction *

40 %
de réduction *

49 %
de réduction *

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Pour la Science – Service abonnements – 19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex – email: pourlascience@abopress.fr

☒ **OUI, je m'abonne à Pour la Science en prélèvement automatique**

PAG18REN

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher) et je complète l'autorisation de prélèvement ci-dessous.

☐ FORMULE INTÉGRALE • 12 n° du magazine papier • 4 Hors-série papier • Accès illimité aux contenus en ligne 7,40€ PAR MOIS -49 % PV7E40	☐ FORMULE PAPIER + HORS SÉRIE • 12 n° du magazine papier • 4 Hors-série papier 5,75€ PAR MOIS -40 % PPV5E75	☐ FORMULE PAPIER • 12 n° du magazine papier 4,90€ PAR MOIS -29 % DPV4E90
---	--	--

2 / Mes coordonnées

Nom :
 Prénom :
 Adresse :
 Code postal : Ville :
 Tél. :
 E-mail : @
 (indispensable pour la formule intégrale)
 J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

Reduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2019 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site <https://boutique.pourlascience.fr>. Photos non contractuelles.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société Pour la Science. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. Pour la Science ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit «RGPD») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

Groupe Pour la Science - Siège social: 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris cedex 14 - Sarl au capital de 32 000€ - RCS Paris B 311 797 393 - Siret : 311 797 393 000 23 - APE 5814 Z

3 / Mandat de prélèvement SEPA

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

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom : Prénom :
 Adresse :
 Code postal : Ville :

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque) :

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

Établissement teneur du compte

Nom :
 Adresse :
 Code postal : Ville :

Date et signature

Organisme Créancier: Pour la Science
 170 bis, bd. du Montparnasse – 75014 Paris
 N° ICS FR92ZZZ426900
 N° de référence unique de mandat (RUM)

**4 / MERCI DE JOINDRE
IMPERATIVEMENT UN RUB**

Partie réservée au service abonnements. Ne rien inscrire

R

ENDEZ-VOUS

P. 82 Logique & calcul
P. 88 Art & science
P. 90 Idées de physique
P. 94 Chroniques de l'évolution
P. 97 Science & gastronomie
P. 98 À picorer

L'UNIVERS ET LA MORALE VUS PAR LA THÉORIE DU CALCUL

Si l'on considère toute interaction physique comme une sorte de calcul, on est amené à repenser l'évolution de l'Univers, voire à donner des fondements computationnels à l'éthique.

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).

L'Univers n'est pas stable; il s'organise progressivement, se «complexifie». La matière et l'énergie sont des éléments essentiels pour comprendre cette évolution du cosmos, mais leur accorder trop d'importance empêche peut-être de saisir vraiment ce qui se passe.

La théorie du calcul nous aide à évaluer les capacités des ordinateurs, notamment leur puissance, à mesurer et à comparer les algorithmes et à donner un sens au mot «complexité». Elle propose une vision de ce qu'est l'évolution de l'Univers en termes non matériels et non énergétiques.

Les scientifiques qui ont contribué à cette vision informationnelle et computationnelle de l'Univers sont nombreux: ils construisent petit à petit une interprétation nouvelle de l'évolution cosmique, vue comme un progrès du calcul, et certains en ont même déduit des considérations éthiques. Parmi les plus importants de ces chercheurs citons Andrei Kolmogorov, Leonid Levin, Gregory Chaitin, Charles Bennett, John Mayfield, Luciano Floridi, Seth Lloyd et plus récemment Hector Zenil, Cédric Gaucherel et Clément Vidal avec qui j'ai travaillé.

Les astrophysiciens décrivent l'histoire cosmique comme un refroidissement faisant apparaître des composants stables de plus en plus complexes, lesquels interagissent et se combinent selon des règles précises conduisant aux atomes, puis aux molécules organiques et à la vie.

Les théoriciens du calcul interprètent cela sous une forme abstraite: petit à petit, l'Univers

a donné naissance à des structures qui, en interagissant, effectuent des sortes de calculs, et la stabilité de ces structures fait que les résultats des calculs sont conservés et accumulés.

Ainsi, l'évolution biologique élabore des organismes vivants aux formes variées. Les calculs avec mémorisation de la génétique s'effectuent avec une efficacité croissante et donnent naissance à une «complexité organisée». En particulier, les vertébrés supérieurs disposent de cerveaux pour traiter les données fournies par les sens et en garder le souvenir et, chez les humains, le langage et l'écriture accroissent l'efficacité des traitements de l'information et le stockage des résultats. Les technologies de l'information conduisent à leur tour à de nouveaux progrès en efficacité de calcul et de mémorisation massive d'informations. Ces soixante dernières années, la vitesse de calcul informatique et la capacité de stockage de l'information ont été multipliées par plus de un million. Le calcul et le stockage cumulatif de l'information progressent dans l'Univers, en même temps qu'augmente la complexité organisée.

DEUX NOTIONS DE COMPLEXITÉ

Le mathématicien soviétique Andrei Kolmogorov, avec Leonid Levin, et, indépendamment, Gregory Chaitin ont proposé une mesure de la complexité des objets numériques (textes, images, sons, vidéos, etc.), qu'on peut appliquer à tous les objets (discrétisés) de l'Univers. La taille du plus court programme engendrant l'objet Ob est cette



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

LA VIE, LES ARTS ET LES SCIENCES VUS COMME UN CALCUL ET UNE ACCUMULATION DE COMPLEXITÉ ORGANISÉE

1

De nombreuses activités humaines sont assimilables à de la manipulation d'informations et donc à des formes de calcul. C'est le cas des activités de création artistique, mais aussi de la recherche scientifique ou mathématique. Bien sûr, les résultats de ces activités sont considérés comme ayant de la valeur et on cherche à les préserver de toutes les façons possibles : en les protégeant, en les multipliant (par exemple grâce aux livres), en les collectionnant (par exemple dans des musées).

De la même façon, on considère que les organismes vivants, qui résultent de longs processus évolutifs assimilables aussi à des calculs, doivent être protégés. La disparition d'une espèce est perçue comme une

perte, tout comme la destruction d'un écosystème fragile.

Il semblerait bien que dans l'esprit de nombreux individus, tout ce qui demande beaucoup de calcul pour se construire ou s'élaborer mérite d'être protégé. Non seulement les contenus en calculs que mesure la « profondeur logique de Bennett » croissent au fur et à mesure que le temps passe, mais ces contenus en calcul semblent avoir de la valeur. Prendre cette idée au sérieux conduit à une éthique de la complexité organisée.

Il est amusant de constater que l'idée que nous devons protéger la diversité du vivant (donc la profondeur logique du monde vivant) ne date pas d'aujourd'hui.

Elle était déjà présente dans le texte de la Bible avec l'histoire de Noé : « Entre dans l'arche, toi et toute ta famille, car je t'ai vu seul juste à mes yeux parmi cette génération. De tous les animaux purs, tu prendras sept paires, le mâle et la femelle ; des animaux qui ne sont pas purs, tu prendras un couple, le mâle et la femelle et aussi des oiseaux du ciel, sept paires, le mâle et la femelle, pour perpétuer la race sur toute la terre. Car encore sept jours et je ferai pleuvoir sur la terre pendant quarante jours et quarante nuits et j'effacerai de la surface du sol tous les êtres que j'ai faits. » (Genèse 7:1-4).



La bibliothèque du monastère de Strahov, à Prague.



L'Arche de Noé sur le mont Ararat, de Simon de Myle (1570).

mesure $K(Ob)$, dénommée complexité de Kolmogorov de Ob . Pour mémoriser un objet numérique, le mieux qu'on pourra faire est de réserver une mémoire de $K(Ob)$ bits d'information en y plaçant ce plus court programme. Le nombre $K(Ob)$ est le contenu en information de l'objet Ob .

Les objets aléatoires ont le plus grand contenu en information : pour les mémoriser, rien n'est sensiblement meilleur que d'en stocker la description non modifiée. En revanche, les objets structurés, par exemple la photo d'une ville ou d'un microprocesseur, la liste des nombres premiers jusqu'à 1 000 000, peuvent être compressés : leur contenu en information est plus petit que leur taille brute.

Puisque les objets aléatoires ont la plus grande complexité de Kolmogorov, cela signifie que cette notion de complexité ne mesure pas la richesse en structures d'un objet. Pour cela, l'Américain Charles Bennett a introduit en 1988

le concept de profondeur logique. C'est le nombre de pas de calcul qu'il faut pour reconstituer l'objet Ob à partir de la représentation compressée optimale de Ob . Plus un objet est structuré, plus il offre des moyens de le compresser, moyens qui, quand on les fait marcher à l'envers (la décompression), exigent de nombreux pas de calcul. La richesse en structures ou complexité organisée est donc assez bien mesurée par le temps de calcul nécessaire pour passer de la forme compressée optimale de Ob à sa forme explicite.

L'évolution cosmique est alors vue comme un processus de perfectionnement des outils exécutant rapidement des calculs et préservant les résultats de ces calculs dans des structures de plus en plus organisées, c'est-à-dire de profondeur logique de plus en plus grande.

Avec un peu de recul, on ne peut qu'être en accord avec cette interprétation de ce qui s'est passé dans les stades primitifs de l'Univers, »

Plus tard avec la formation des étoiles et des galaxies, et plus tard encore sur la Terre avec la vie. L'apparition des organismes vivants, des vertébrés supérieurs, des humains, de leurs cultures, de leurs technologies, sont des étapes du progrès à la fois dans la richesse en organisation du monde, et de la capacité des objets du monde à produire efficacement de nouvelles structures et à les préserver.

L'Univers est ainsi une sorte de gigantesque ordinateur se perfectionnant, produisant et préservant sans relâche des objets dont la profondeur logique s'accroît.

L'idée que l'évolution biologique doit être vue comme un calcul est en particulier défendue par John Mayfield, de l'université de l'État de l'Iowa, dans son livre de 2013, *The Engine of Complexity, Evolution as Computation*. Même si

On peut faire un parallèle entre le contenu en calcul que mesure la profondeur logique de Bennett et le concept d'«émergie» qu'a élaboré et défendu l'écologue américain Howard Odum. Pour un système vivant, social ou technologique, l'émergie est la quantité d'énergie qui a été nécessaire pour le créer. On ramène souvent cette énergie accumulée à de l'énergie solaire pour faciliter les comparaisons. De la même façon, la profondeur logique de Bennett mesure la quantité de calculs nécessaire pour obtenir l'objet à partir de son origine probable. Les deux concepts pourraient se retrouver et des conversions des évaluations de l'un en évaluations de l'autre seraient envisageables... si le coût énergétique du calcul était constant, ce qui n'est pas le cas, du fait des progrès spectaculaires de nos dispositifs électroniques de calcul.

Plus généralement, selon l'endroit de l'Univers pris en compte, l'énergie dépensée pour un calcul change considérablement. Par ailleurs, une grande quantité d'énergie peut être dépensée sans que rien n'en reste, si aucun dispositif de mémorisation n'est là pour protéger et conserver les résultats des calculs. Les molécules d'eau qui s'agitent dans la mer interagissent, ce qu'on peut assimiler à un immense calcul parallèle, mais les calculs s'effacent d'instant en instant et toute l'énergie correspondant à cette agitation ne laisse aucune trace.

La profondeur logique de Bennett est une mesure du travail de calcul nécessaire pour obtenir une structure, mais cette mesure ne prend en compte que les calculs dont les résultats persistent directement ou indirectement. Le contenu en calcul qui mesure la complexité organisée n'est pas évaluable en termes énergétiques: c'est autre chose!

CE À QUOI NOUS TENONS

Munis de ce concept de contenu en calcul et réfléchissant à la valeur des choses, nous constatons une forme de cohérence et d'unité dans ce que nous aimons et défendons.

La vie humaine est bien sûr une chose que nous souhaitons protéger. Chaque vie humaine est une richesse en expériences accumulées, en culture, en intelligence, ainsi qu'en capacités à produire ses propres objets complexes. L'art et la littérature créent des objets qui, soit directement, soit par la position qu'ils occupent dans les sociétés humaines, enrichissent l'information et la complexité structurelle. Chaque composition musicale nouvelle, par ses organisations de rythmes, d'harmonies, de mélodies enrichit les répertoires déjà connus et préservés.

Les sciences, en perfectionnant les rapports qui existent entre le monde et l'image que nous en avons, ainsi que nos moyens d'action construisent de nouvelles structures dans l'Univers. Ces structures s'affinent par la recherche, c'est-à-dire par l'organisation

L'Univers est une sorte de grand ordinateur qui accroît sans cesse la complexité organisée

Les calculs de l'évolution et de la sélection naturelle sont assez différents de ceux qu'un ordinateur réalise, on sait bien, et c'est la clé de la biologie moderne, que les ADN et les ARN portent de l'information, la combinent, la copient et, sur le long terme, la modifient et en perfectionnent les contenus, faisant apparaître des organismes de plus en plus complexes par compétition et coévolution.

La pertinence du concept de profondeur logique en biologie est aussi défendue par Antoine Danchin et par Cédric Gaucherel, lequel a mené des expériences mettant en évidence l'accroissement de la profondeur logique dans la dynamique évolutive d'écosystèmes simplifiés.

La complexité de Kolmogorov, bien qu'elle constitue un concept clé pour penser le monde en termes informationnels, n'est pas utilisable directement pour parler de la «complexification» de l'Univers tels que les astrophysiciens et les biologistes la mentionnent. Ce n'est pas le contenu en information qui augmente au cours du temps (ce contenu est maximal pour les objets aléatoires), mais le contenu en structures mesuré par la profondeur logique de Bennett.

d'expérimentations, assimilables à des calculs, et des progrès des théories physiques et mathématiques, également assimilables à des calculs.

La plupart d'entre nous pensons que préserver les espèces menacées de disparition est une nécessité morale et qu'il est beaucoup plus grave de laisser une espèce disparaître que tuer un individu d'une espèce animale à la population prospère. Ce jugement moral correspond à un principe de maximisation de la profondeur logique de Bennett.

PRÉSERVER LA BIODIVERSITÉ, C'EST PRÉSERVER LA COMPLEXITÉ

En effet, la profondeur logique de Bennett de l'ensemble de la biosphère ne varie que très peu quand un individu d'une espèce nombreuse disparaît, alors qu'elle diminue sensiblement quand le dernier représentant d'une espèce meurt. Préserver la diversité animale, c'est préserver la complexité organisée sur Terre, c'est préserver sa profondeur logique. Quand Noé emplit son arche, il tente de conserver la diversité du monde animal et agit avec les moyens limités dont il dispose en ne prenant qu'un petit nombre de couples de chaque espèce.

Le principe écologiste plus général selon lequel nous devons préserver notre environnement est de même nature: la richesse des interactions des espèces animales et végétales d'un écosystème est une organisation que nous avons le devoir de préserver, car nous ne saurions pas la reconstituer (ou cela serait très difficile).

Détruire un livre dont il n'existe qu'un seul exemplaire, brûler des tableaux dont on n'a aucune copie, saccager ou démolir des monuments, des sculptures, des objets anciens témoins de civilisations disparues, tout cela nous semble éthiquement incorrect. Tout ce qui contribue à faire baisser la complexité organisée du monde est, dans l'esprit de la plupart des humains, une mauvaise chose.

À l'inverse, créer, conserver, collectionner est considéré comme une bonne chose pour la majorité d'entre nous. Nous dépensons de l'argent et des moyens pour que les œuvres d'art anciennes soient collectées, restaurées, soigneusement répertoriées, photographiées et rangées, par exemple dans nos musées. Sans le formuler explicitement, nous cherchons à protéger et à augmenter la complexité organisée du monde.

UNE ÉTHIQUE DE LA COMPLEXITÉ ORGANISÉE

Il résulte de cette analyse la formulation d'une éthique universelle de la complexité organisée: le bien, c'est conserver, créer et contribuer à faire croître la complexité organisée, c'est-à-dire les contenus en calculs de l'Univers mesurables par la profondeur logique.

À la suite de Charles Bennett, Clément Vidal et moi cherchons à préciser cette

2

Isaac Asimov
(1920-1992)



DES VALEURS AU-DELÀ DE L'HUMAIN ?

Les lois et la morale protègent les vies humaines, et un peu moins les vies animales et la variété des richesses végétales. Mais peu à peu s'impose l'idée qu'une éthique ouverte doit aller au-delà de l'être humain et se préoccuper de la vie dans son ensemble.

L'antispécisme, l'écologie politique proposent des valeurs qui ne s'arrêtent pas aux humains. Par ailleurs, l'idée qu'il est immoral de détruire les œuvres du passé (livres, monuments, peintures et sculptures en exemplaires uniques) confirme que nous avons une conception éthique reconnaissant une valeur à tout ce qui résulte d'un travail important d'élaboration ou de calcul (êtres vivants, œuvres d'art, théories scientifiques...).

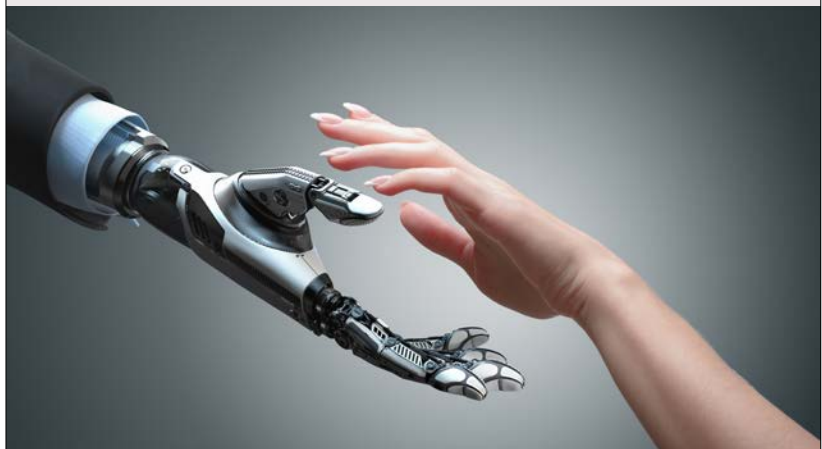
Cette éthique de la complexité organisée, appliquée aux robots intelligents, proposera autre chose que les trois lois de la robotique imaginées par Isaac Asimov :

1. Un robot ne peut porter atteinte à un humain ni, en restant passif, permettre qu'un humain soit exposé au danger.
2. Un robot doit obéir aux ordres qui lui sont donnés par un humain, sauf si de tels ordres entrent en conflit avec la première loi.

3. Un robot doit protéger son existence tant que cette protection n'entre pas en conflit avec la première ou la deuxième loi.

Une éthique de la complexité organisée ne demandera pas aux robots intelligents, quand ils existeront, d'être nos esclaves (ce que fait Asimov), mais leur demandera de respecter tout ce qui contient les traces d'un long processus d'élaboration ou, dit dans le langage de Charles Bennett, tout ce qui contient beaucoup de profondeur logique. De plus, une telle éthique sera disposée à attribuer aux robots eux-mêmes une valeur exigeant un respect, comme on en doit aux humains et aux autres êtres vivants. Si un jour se produisait une rencontre de l'humanité avec d'autres formes de vie, une éthique de la complexité organisée nous commanderait de les respecter et leur commanderait de nous respecter.

L'universalité de cette éthique de la complexité organisée susceptible de s'appliquer aux robots intelligents comme à d'autres formes de vie nous ferait partager avec eux une vision morale, ce qui serait un bon point de départ.



3

LES CHANGEMENTS PROFONDS DU COSMOS

▢ éthique qui pourrait servir de terrain d'entente et de rencontre à un grand nombre de morales. L'idée d'une éthique liée à l'information avait déjà été défendue, sous une forme un peu différente, dès 2003 par le philosophe italien Luciano Floridi. Il tentait de distinguer l'information utile ayant pour lui de la valeur et qu'on doit considérer comme un bien, de l'information inutile comme celle contenue dans une suite de tirages aléatoires. Malheureusement, sans le concept de profondeur logique, il ne pouvait donner à ses intuitions le caractère rigoureux maintenant devenu possible grâce aux avancées mathématiques de Charles Bennett.

Personne ne peut démontrer une éthique et nul ne prétend démontrer celle de la complexité organisée. Ses défenseurs remarquent cependant plusieurs points en sa faveur.

Elle est déjà présente dans une grande majorité de systèmes moraux et éthiques; elle pourrait donc rassembler un grand nombre de personnes sur un même terrain d'entente. Et elle promeut des principes universels selon deux sens complémentaires.

UN SOCLE COMMUN AUX DIVERS SYSTÈMES ÉTHIQUES?

D'une part, l'éthique s'oppose aux nationalismes, aux « spécismes » (la croyance que certaines espèces méritent de la considération, à l'exclusion de toutes les autres) et aux morales étroites n'accordant de la valeur qu'à des êtres ou objets très particuliers. Elle promeut une idée généreuse et large de ce qui doit être préservé et encouragé.

D'autre part, elle peut être adoptée par tous les êtres doués d'autonomie et ayant des

On a cherché à identifier ce qui, au cours du temps, pourrait mesurer la complexification de l'Univers, illustrée ici par une gravure du biologiste allemand Ernst Haeckel.

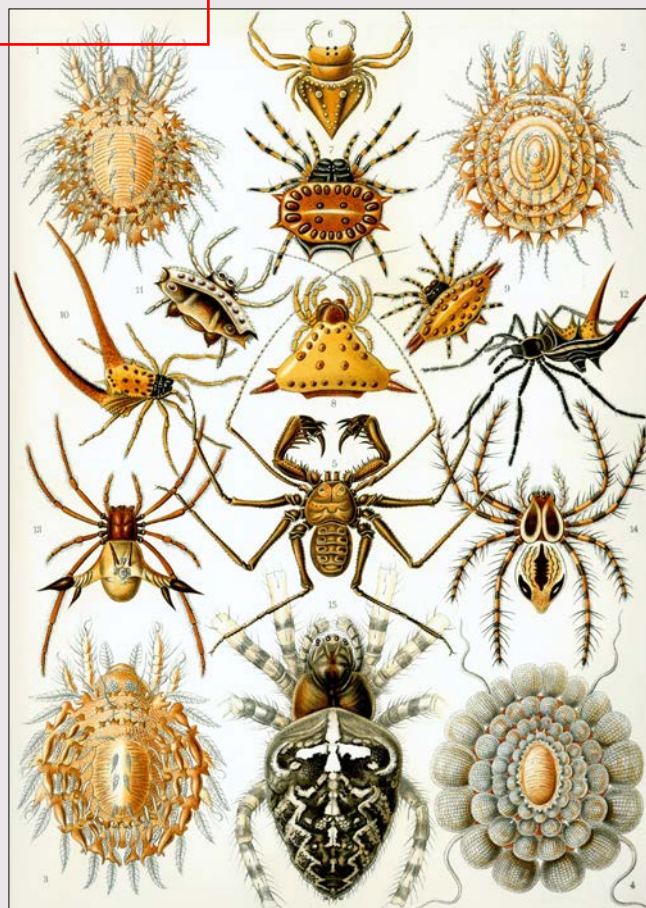
Eric Chaisson, de l'université Harvard, propose une idée

thermodynamique : selon lui, le niveau de complexité des structures physiques s'évalue par la dissipation d'énergie libre par unité de masse. Cette mesure semble pertinente pour certains objets, mais pas pour nos objets technologiques récents. Nos ordinateurs ont une dissipation d'énergie libre par unité de masse qui évolue peu au fil des décennies, alors que leur puissance de calcul et de mémorisation de l'information augmente considérablement et que, de toute évidence, ils sont devenus plus complexes.

Certains argumentent d'ailleurs qu'une mesure de complexité d'organisation ne doit pas se fonder sur la thermodynamique : une partition de musique complexe l'est indépendamment de tout concept d'énergie, et il en est de même d'un théorème mathématique ou d'un programme calculant les nombres premiers. Il n'y a pas non plus de différence thermodynamique claire entre un ordinateur qui répète un milliard de fois le calcul $1 + 1 = 2$ et un ordinateur qui parvient à prouver un théorème difficile. Pourtant, l'un est simple à concevoir et ne produit rien d'utile, tandis que l'autre est incomparablement plus complexe et organisé et donne d'intéressants résultats.

Charles Bennett a donc proposé une autre mesure de complexité organisée : la profondeur logique. En première approximation, pour un objet donné, c'est le temps qu'il faut pour décompresser la meilleure version compressée des informations décrivant l'objet (voir le texte principal, page 83). Avec cette notion qui s'affranchit de la physique, une nouvelle compréhension de l'évolution cosmique et du monde vivant devient possible.

Le Prix Nobel de physique Murray Gell-Mann croit lui aussi que l'existence de structures complexes n'est pas directement liée à la thermodynamique. Il écrit : « Le deuxième principe de la thermodynamique exige une augmentation de l'entropie moyenne (ou désordre), mais n'interdit nullement à l'ordre local de se produire par divers mécanismes d'autoorganisation : ceux-ci figent certains accidents et produisent des régularités qui peuvent alors se diffuser. » Ces accidents figés sont comme des calculs que l'Univers mémorise. Ce qui change au cours du temps dans l'Univers, c'est sa capacité à calculer et à mémoriser les résultats de ses calculs, ou, en termes de l'idée de Bennett, c'est la profondeur logique de l'Univers qui s'accroît.



L'une des nombreuses et magnifiques planches du naturaliste et libre penseur allemand Ernst Haeckel (1834-1919), dont cent ont été publiées dans ses *Formes artistiques de la nature* (*Kunstformen der Natur*).

décisions à prendre, que ce soient des humains, des animaux, des extraterrestres (s'il en existe) ou même des robots.

A une époque où nous commençons à envisager que nous aurons à vivre avec des êtres intelligents de nature différente de la nôtre, il est intéressant de savoir qu'une éthique de formulation simple, qui n'est pas centrée uniquement sur l'être humain comme le sont les lois de la robotique d'Asimov (*voir l'encadré 2*), est possible. L'idée que nous aurons peut-être à nous entendre avec d'autres mondes vivants que celui de la Terre et qu'il faudra donc partager des valeurs avec eux et penser le bien et le mal sans le référer uniquement aux humains ou au monde vivant d'ici rend aussi cette éthique intéressante. Elle va dans le sens de l'élargissement des considérations morales récentes, qui exigent que nous préservions le monde environnant et que nous cessions de le dégrader en faisant comme si seuls les humains comptaient.

ÉVALUER LA COMPLEXITÉ ORGANISÉE N'EST PAS SI FACILE

Bien que l'idée générale soit simple et repose sur un concept mathématique, tout ne devient pas facile pour autant. Celui qui adoptera cette éthique de la complexité organisée devra affronter au moins trois obstacles.

Premièrement, la complexité organisée n'est pas facile à évaluer. Même si notre intuition nous permet souvent de savoir où réside cette complexité, les comparaisons restent délicates: qui peut juger que telle musique contient une richesse en structures plus grande que telle autre? De plus, même si une définition mathématique existe, il n'est pas facile d'en tirer des outils de mesure précis, car toute tentative de mesure rencontre l'obstacle de l'explosion combinatoire des calculs à mener: mesurer un contenu en calcul en demande énormément!

Deuxièmement, il n'est pas clair si l'on doit chercher à rendre maximale la complexité organisée du monde, ou la complexité organisée moyenne dans le monde. Cela ne revient pas au même: dans un cas, on évitera toute recopie, dans l'autre on accordera beaucoup d'importance à la circulation, à la diffusion et à la multiplication des copies d'une structure complexe. D'autres problèmes de ce type se posent.

Troisièmement, face à un choix entre plusieurs actions, déterminer celle qui satisfera le mieux le principe de maximisation de la complexité organisée ne sera pas évident puisqu'il faudra anticiper les effets du choix, et donc faire des paris sur les chaînes causales enclenchées par les diverses options.

Toutefois, ces difficultés ne rendent pas impossible ou absurde l'adoption d'une

éthique de la complexité organisée. Les trois problèmes mentionnés existent aussi pour toute autre éthique. Imaginons par exemple que l'on considère que le bien est tout ce qui contribue au bonheur humain, idée assez souvent acceptée implicitement en politique et dans bien des esprits. Prendre au sérieux une telle éthique humaniste du bonheur et vouloir l'appliquer avec rigueur obligerait à disposer de définitions claires de ce qu'est le bonheur humain et des outils pour le mesurer. Ce n'est évidemment pas le cas: il n'existe pas de méthodes faisant l'unanimité pour évaluer le bonheur humain, dont d'ailleurs chacun a sa propre conception.

Celui qui prendrait comme but le bonheur humain, même s'il savait l'évaluer, aurait aussi à choisir entre maximiser le bonheur moyen des humains, ou le bonheur du plus malheureux, ou le bonheur du plus heureux (option peu probable, vers laquelle on se demande pourtant si ce n'est pas ce vers quoi tendent nos sociétés). Ces questions liées au partage des richesses, on le sait, ne font pas l'unanimité et sont au contraire le sujet de disputes politiques de toutes sortes.

Face à chaque décision à prendre, reste aussi à prévoir ce qui résultera à moyen et long termes des diverses options et leurs conséquences pour le type de bonheur humain qu'on aura choisi de favoriser. C'est le problème d'anticipation des effets.

On le voit, les trois difficultés mentionnées que rencontre une éthique de la complexité organisée ont leur contrepartie exacte pour une éthique du bonheur humain. Les objections à faire à une éthique de la complexité organisée ne peuvent donc pas porter sur la difficulté qu'il y a à la mettre en œuvre, qui n'est pas supérieure à la difficulté que rencontrent d'autres éthiques.

Répetons-le, une éthique ne se démontre pas, elle n'est pas un fait, vrai ou faux, elle est juste une conception qu'on adopte ou non pour choisir ce qu'on fera, et déterminer ce que sont le bien et le mal. Les réflexions dans lesquelles on se trouve engagé en envisageant une éthique de la complexité organisée méritent certainement qu'on les approfondisse, surtout qu'elles nous amèneraient à une morale élégante et aux visées autorisant mieux des dépassements de soi que les morales strictement humanistes ou centrées sur des valeurs étroites.

Un nouveau défi s'offre à tous: concevoir pour nous et nos descendants des idéaux moraux scientifiquement fondés et aussi universels que possible, accordant de la valeur aux humains, à la vie en général, aux arts et aux sciences et qui soient adaptés à un monde élargi de robots et peut-être de vies différentes de la vie terrestre. ■

BIBLIOGRAPHIE

J.-P. Delahaye et C. Vidal, **Organized complexity : Is big history a big computation ?**, *APA Newsletter on Philosophy and Computers*, vol. 17(2), pp 49-54, 2018 (<https://bit.ly/2MohCIV>).

J.-P. Delahaye et C. Vidal, **Universal ethics : Organized complexity as an intrinsic value**, dans G. Yordanov et al. (éd.), *Evolution, Development and Complexity : Multiscale Evolutionary Models of Complex Adaptive Systems*, Springer, 2018 (<https://doi.org/10.5281/zenodo.1172976>).

C. H. Bennett, **Evidence, computation, and ethics**, *Simons Symposium on Evidence in the Natural Sciences*, 2014 (<https://bit.ly/2zqIpwk>).

C. Gaucherel, **Ecosystem complexity through the lens of logical depth : Capturing ecosystem individuality**, *Biological Theory*, vol. 9(4), pp. 440-451, 2014.

C. H. Bennett, **Logical depth and physical complexity**, dans R. Herken (éd.), *The Universal Turing Machine : A Half-Century Survey*, pp. 227-257, Oxford Univ. Press, 1988 (bit.ly/PLS491_Delahaye).

L'AUTEUR



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

LISEZ-VOUS LE RONGORONGO ?

L'ancienne écriture de l'île de Pâques réunit divers signes: poissons, hommes-oiseaux, croissants de lune... L'un d'eux correspond au pectoral en bois sculpté que portait l'élite de la société pascuane. Une exposition à Figeac fait le point sur ce que l'on sait de cette écriture, toujours indéchiffrée.

D

e l'île de Pâques, on ne retient le plus souvent que les moais, ces grandes statues de pierre, et les mésaventures des Pascuans, prétendument obligés de quitter leur île après en avoir épuisé les ressources. Rien n'est plus réducteur, voire erroné. Trois expositions rétablissent la vérité, battent en brèche les idées reçues et mettent en avant la richesse de la culture pascuane. Elles se répartissent entre trois villes d'Occitanie: Figeac, Rodez et Toulouse, chacune avec sa spécificité.

Dans la ville rose, au Muséum, place à la climatologie, la géologie, l'ethnologie...

pour raconter, à l'aune des dernières découvertes scientifiques l'histoire de l'île. À Rodez, le musée Fenaille met en avant une statuaire et un univers de représentations encore trop méconnu. On peut y voir un *reimiro*, un ornement en bois, en forme de croissant dont les extrémités représentent des queues de cétacés (voir la photo ci-contre). Ce pectoral était porté par les aristocrates et par l'*ariki mau*, le chef suprême de l'île.

Certains *reimiro* arborent des signes, des sortes de hiéroglyphes, semblables à ceux que l'on trouve notamment sur des tablettes gravées. Mais plus encore, le *reimiro* semble parfois être l'un de ces signes! De quoi parle-t-on? Du *rongorongo*, l'écriture encore non déchiffrée de l'île de Pâques. Pour comprendre, direction la troisième exposition, au musée Champollion de Figeac, consacrée à cette écriture qui défie encore les linguistes. Ils n'en ont pas moins élucidé certains mystères que les commissaires, Konstantin Pozdniakov, de l'Institut national des langues et

Ce pectoral en bois sculpté est aussi l'un des signes de l'écriture de l'île de Pâques.

civilisations orientales (Inalco) et Paul Horley, de la Société des océanistes et de l'Easter Island Foundation, donnent à voir.

L'écriture a été découverte en 1864 par Eugène Eyraud, le premier missionnaire chrétien à avoir foulé le sol de l'île. Selon ses dires, les habitants en faisaient peu de cas et semblaient en avoir oublié le sens. Toujours est-il qu'on récupéra le plus possible de témoignages pour constituer aujourd'hui un ensemble de... 26 textes seulement, pour un total d'environ 14000 signes, ou glyphes.

Que sait-on du *rongorongo*, une écriture sans lien avec aucune autre? En 1873, l'évêque de Tahiti, Tepano Jaussen,





découvrit avec l'aide d'un Pascuan qu'elle se lit en boustrophédon (comme un bœuf laboure un champ) inversé. La première ligne se lit de gauche à droite, puis on tourne la tablette de 180° pour lire la ligne suivante dans le même sens. C'est unique!

Une autre découverte importante eut lieu dans les années 1930, quand deux lycéens de Leningrad (aujourd'hui Saint-Petersbourg), en Russie, se rendirent compte de plusieurs répétitions dans les textes. On mit alors au jour des variations de glyphes ainsi que des ligatures, c'est-à-dire quand deux signes sont combinés en un seul, ce qui permit de dresser un catalogue exhaustif. Peu après la Seconde

Guerre mondiale, certains proposèrent de voir des généalogies sur des tablettes. Plus récemment, on a identifié des représentations de calendriers, avec notamment le glyphe d'une pleine lune, un cercle, avec à l'intérieur, un homme assis sur une petite montagne. Étonnamment, ces motifs correspondent assez bien aux mers lunaires!

Grâce aux travaux de Konstantin Pozdniakov, et de son père, les quelque 600 signes reconnus auparavant ont été réduits à seulement 52 signes indépendants, dont le pectoral. Plus encore, leurs travaux, fondés sur des analyses statistiques, tendent à montrer que le *rongorongo* serait en grande partie une écriture syllabique.

Enfin, des études récentes ont révélé que les scribes faisaient beaucoup d'erreurs dans les dessins préparatoires à la gravure des signes. Les analyses continuent et peut-être un jour comprendra-t-on le *rongorongo*. Et vous? Vous en savez désormais (presque) autant que les spécialistes, vous pouvez alors vous rendre à Figeac et essayer à votre tour de déchiffrer le *rongorongo*! ■

Les trois expositions consacrées à l'île de Pâques, dont celle de Figeac, jusqu'au 4 novembre 2018 : www.iledepaquesexpo.fr



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

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY et ÉDOUARD KIERLIK
professeurs de physique à Sorbonne Université, à Paris

FAIRE D'UN SMARTPHONE UN MICROSCOPE PERFORMANT

Réaliser sur le terrain des observations microscopiques de qualité avec un simple téléphone portable est désormais possible – et à la portée de toutes les bourses.

Faire un examen microscopique d'une goutte de sang en pleine jungle quand on soupçonne une crise de paludisme? Jusque récemment, c'était impossible sans du matériel coûteux, encombrant et fragile. Mais cela va changer. Car en associant à un smartphone un dispositif optique approprié, petit et réalisable à peu de frais avec une imprimante 3D par exemple, on peut obtenir un microscope mobile de bonne qualité et ayant la résolution requise, de l'ordre du micromètre.

Comme la plupart des autres microorganismes, le parasite responsable du paludisme a une taille de l'ordre de quelques micromètres. Impossible donc à observer à l'œil nu: avec un pouvoir de résolution angulaire de l'ordre de 1 minute d'arc, l'œil parvient tout juste à distinguer des détails d'au moins 50 micromètres (ou 0,05 millimètre).

Une loupe grossissant dix fois ne suffit pas, et il faut donc s'orienter vers un instrument d'optique plus perfectionné, le microscope.

COMBINER DEUX LENTILLES

Un microscope optique comporte en général un objectif qui permet d'obtenir une image agrandie mais inversée d'un objet, que l'on regarde ensuite sans accommoder à travers une loupe appelée oculaire (voir l'encadré page ci-contre). En combinant ainsi les grossissements des deux lentilles (ou systèmes de lentilles), on atteint facilement les valeurs suffisantes ($\times 100$ ou $\times 400$, voire plus) pour observer des microorganismes.

Or les téléphones portables d'aujourd'hui intègrent un appareil photo de bonne qualité. Ne suffit-il pas d'ajouter à un tel appareil un « objectif » pour le transformer en microscope? Et de s'inspirer de Manu Prakash, à l'université



Stanford, qui a utilisé une toute petite bille de verre, peu coûteuse, pour réaliser un microscope-origami (voir la bibliographie)?

Hélas, l'une des difficultés en microscopie est d'obtenir une bonne résolution sur un champ de vision large, ce qui demande de corriger les aberrations: aberrations chromatiques liées à la présence de différentes longueurs d'onde dans la lumière que les verres dispersent comme dans un prisme, aberrations géométriques dues aux rayons qui sont très inclinés par rapport aux surfaces des lentilles et qui vont rendre floue l'image. Ce dernier point est en pratique rédhibitoire

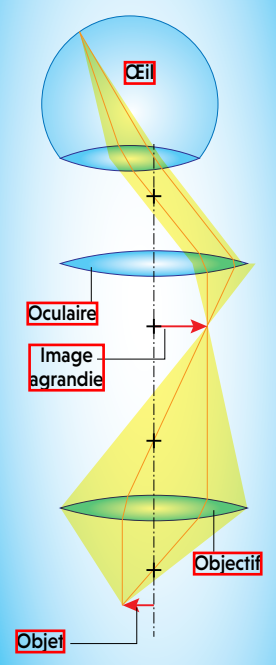
LE TÉLÉPHONE-MICROSCOPE PORTABLE

La microscopie optique nécessite deux lentilles (ou deux systèmes de lentilles) l'une faisant office d'oculaire, l'autre d'objectif (a). Un dispositif simple et peu coûteux consiste à associer à un téléphone portable moderne, muni d'un écran et d'un objectif photographique, un deuxième objectif identique (b, c). L'image formée sur le capteur électronique du téléphone est alors agrandie sur l'écran. La coque en résine, obtenue par impression 3D, comporte des tunnels qui guident la lumière du flash de l'appareil : cette lumière est d'abord diffusée par une paroi avant de traverser l'échantillon observé et d'atteindre le capteur.



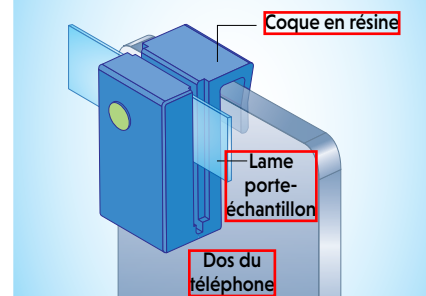
a

PRINCIPE D'UN MICROSCOPE



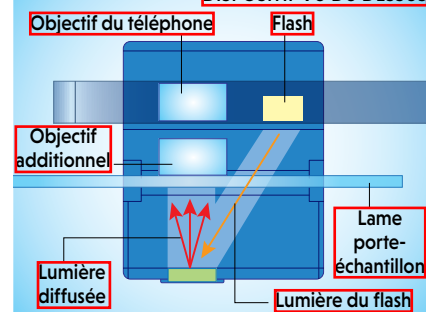
b

DISPOSITIF VU EN PERSPECTIVE



c

DISPOSITIF VU DU DESSUS



pour l'utilisation de billes de verre : la zone de netteté au voisinage de l'axe optique est trop limitée.

On peut aussi s'orienter vers des systèmes à plusieurs lentilles, voire placer un ensemble objectif-oculaire devant le téléphone qui sert alors d'œil. Mais ces systèmes sont coûteux, peu robustes et ne profitent pas pleinement du champ de vision angulaire élevé des smartphones (jusqu'à 60 degrés) : l'image qu'ils forment n'occupe pas l'intégralité de la surface du capteur de l'appareil photographique et donc, *in fine*, de l'écran du téléphone.

En 2014, trois chercheurs de l'université de Californie à Berkeley, Neil Switz,

Michael D'Ambrosio et Daniel Fletcher, ont proposé d'utiliser en externe le même objectif que celui du smartphone, mais renversé. Un tel objectif est peu coûteux compte tenu de sa production en série, et le champ de vision est exploité pleinement. En plaçant l'échantillon à observer dans le plan focal de l'objectif externe, on obtient une image inversée de même taille dans le plan image de l'objectif interne, c'est-à-dire là où se trouve le capteur de l'appareil photo. Il n'y a donc pas de grossissement au niveau du capteur, mais, à cause de la taille réduite des pixels du capteur (1,4 micromètre), la résolution est quand même micrométrique !

L'image étant affichée sur l'écran de l'appareil, qui est beaucoup plus grand que le capteur, elle est grossie. Avec un iPhone 4S (écran de 33 centimètres carrés, capteur de 16 millimètres carrés), on obtient au mieux un grossissement de 14,4. Mais comme il y a plus de pixels sur le capteur (3264×2448) que sur l'écran (960×640), on peut zoomer électroniquement. On atteint ainsi un grossissement effectif d'environ 60 fois.

Les auteurs ont récemment publié : **En avant la physique !**, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).



Il faut aussi tenir compte de la diffraction de la lumière, qui produit sur le capteur des taches un peu plus grandes qu'un pixel. *In fine*, Daniel Fletcher et ses collègues ont obtenu une résolution de l'ordre de 5 micromètres sur un champ de vision de 10 millimètres carrés.

BIEN ÉCLAIRER L'ÉCHANTILLON

Utiliser un objectif supplémentaire identique à celui du téléphone ne suffit pas, cependant. Il faut aussi placer et éclairer l'échantillon correctement! Pour le positionnement, le développement des techniques d'impression 3D a changé la donne, car on peut produire en série et pour un coût modique des coques où s'insèrent, par un simple clip, l'objectif, la lame porte-échantillon et le téléphone. Reste le problème de l'illumination.

En microscopie optique, l'éclairage le plus souvent utilisé est en transmission (la lumière traverse l'échantillon). Les raisons sont multiples et liées à la nécessité d'avoir assez de lumière au niveau de l'œil malgré le fort grossissement, à l'encombrement du système d'éclairage, au fait qu'on s'intéresse à l'intérieur de l'échantillon (des cellules biologiques par exemple) plutôt qu'à sa surface...

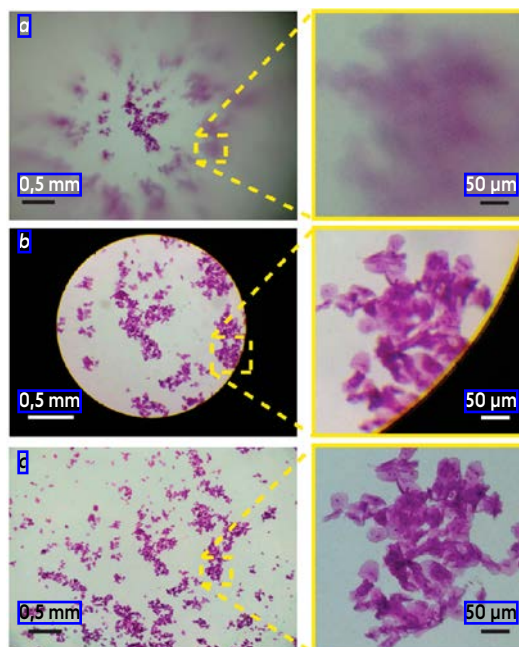
Dans les microscopes à base de smartphone, on faisait appel jusqu'à tout récemment à une source externe, par exemple une simple LED dont l'éclairage est rendu à peu près uniforme en intercalant un filtre diffuseur sur le trajet optique. Cet ajout était-il nécessaire? Jeremy Thompson, Brant Gibson et deux collègues, aux universités RMIT et d'Adélaïde, en Australie, ont tout récemment montré que non.

Cette équipe a eu l'idée d'utiliser le puissant flash qu'intègrent la plupart des smartphones et de créer dans la coque support des tunnels qui guident la lumière du flash vers une paroi de la coque, puis acheminent la lumière ainsi diffusée jusqu'au capteur photo en passant à travers l'échantillon (voir l'encadré page précédente). Ainsi, nul besoin d'ajouter un quelconque miroir ou écran dans le dispositif, que l'on peut donc toujours fabriquer en monobloc.

La résine noire dont est faite la coque absorbe certes de la lumière, mais elle en diffuse suffisamment pour éclairer convenablement l'échantillon. Des 45 milliwatts nominaux du flash ne subsistent que 2 microwatts au niveau de l'échantillon. L'atténuation est forte, mais cet éclairage correspond à la puissance que l'échantillon recevrait à environ 2 mètres

DES IMAGES DE BONNE QUALITÉ

En associant un objectif supplémentaire identique (mais en position inversée) à celui du téléphone portable, on obtient des images microscopiques de bonne qualité (c), meilleures que celles obtenues en associant au téléphone une petite bille de verre (a) ou un dispositif constitué d'un oculaire et d'un objectif (b). Il s'agit ici d'images de cellules épithéliales colorées. On constate notamment qu'avec le dispositif à deux objectifs, le champ de vision est plus vaste et sans distorsions, comparé au champ de vision des deux autres dispositifs.



du flash. Cette illumination suffit, tout en évitant de saturer le capteur de l'appareil photographique.

Par ailleurs, grâce à la diffusion de la lumière, les rayons qui éclairent l'échantillon sont d'inclinaisons très variées, ce qui permet de bien profiter de l'ouverture de l'objectif. La taille de la surface diffuse et sa distance à l'échantillon sont choisies en conséquence.

Mieux encore, ce microscope ambulant peut fonctionner même quand le flash est éteint. En effet, en l'absence d'éclairage direct, on obtient quand même, sous certaines conditions, une image: la lumière ambiante peut se réfléchir plusieurs fois sur les faces de la lame porte-échantillon, qui sert alors de guide de lumière, jusqu'à être diffusée par l'échantillon lui-même. Grâce aux tunnels au sein de la coque de résine, seule cette lumière diffusée traverse les objectifs et atteint le capteur photographique.

L'image ainsi obtenue est donc sur fond noir. C'est particulièrement utile pour observer des objets presque transparents, comme le sont notamment certains organismes aquatiques.

L'équipe australienne a ainsi démontré que leur microscope mobile permet d'observer des noyaux cellulaires, du zooplancton, des spermatozoïdes... sur fond noir ou sur fond clair, selon les cas. ■

BIBLIOGRAPHIE

A. Orth et al., **A dual-mode mobile phone microscope using the onboard camera flash and ambient light**, *Scientific Reports*, vol. 8, article 3298, 2018.

N. A. Switz et al., **Low-cost mobile phone microscopy with a reversed mobile phone camera lens**, *PLoS One*, vol. 9(5), article e95330, 2014.

J.-M. Courty et É. Kierlik, **Un microscope pour moins d'un euro**, *Pour la Science* n° 443, pp. 86-88, septembre 2014.

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

**COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION
DÈS MAINTENANT !**



N° 490 (août 18)
réf. PL490



N° 489 (juillet 18)
réf. PL489



N° 488 (juin 18)
réf. PL488



N° 487 (mai 18)
réf. PL487



N° 486 (avril 18)
réf. PL486



N° 485 (mars 18)
réf. PL485



N° 484 (févr. 18)
réf. PL484



N° 483 (janv. 18)
réf. PL483



N° 482 (déc. 17)
réf. PL482



N° 481 (nov. 17)
réf. PL481



N° 480 (oct. 17)
réf. PL480



N° 479 (sept. 17)
réf. PL479

A retourner accompagné de votre règlement à :
Pour la Science – Service VPC – 19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex – email : pourlascience@abopress.fr



OUI, je commande des numéros de Pour la Science, au tarif unitaire de 9,90 €.

1 / JE REPORTE CI-DESSOUS LES RÉFÉRENCES à 5 chiffres correspondant aux numéros commandés :

1^{re} réf. x 9,90 € = €
2^e réf. x 9,90 € = €
3^e réf. x 9,90 € = €
4^e réf. x 9,90 € = €
5^e réf. x 9,90 € = €
6^e réf. x 9,90 € = €

TOTAL À RÉGLER €

Groupe Pour la Science – Siège social: 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris Cedex 14 – Sarl au capital de 32000 € – RCS Paris B 311 797 393 – Siret: 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z

Offre valable jusqu'au 31/12/2019 en France Métropolitaine uniquement. Pour l'export, rendez-vous sur notre site internet boutique.pourlascience.fr. Les prix affichés incluent les frais de port et les frais logistiques.
Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société Pour la Science. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. Pour la Science ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme
Nom :
Prénom :
Adresse :

Code postal Ville :
Téléphone
J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science
☐ Carte bancaire
N°
Date d'expiration
Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB)
Signature obligatoire :



**RETROUVEZ TOUS LES ANCIENS NUMÉROS SUR
BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR**

L'AUTEUR



HERVÉ LE GUYADER
professeur émérite de biologie
évolutive à Sorbonne
Université, à Paris

LA LEVURE DE BOULANGER VIENT DE CHINE

En étudiant la diversité des lignées de la levure *Saccharomyces cerevisiae*, des généticiens sont remontés aux sources de cette espèce.

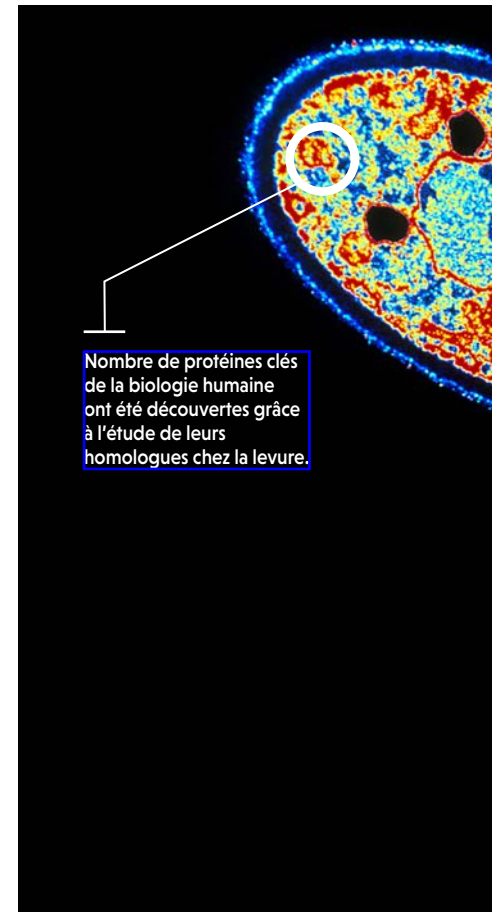
Pain, vin, bière... toutes les civilisations ont fait fermenter des aliments à l'aide de *Saccharomyces cerevisiae*, la levure de bière ou levure de boulanger. Mais qui a commencé? Très probablement les Chinois. C'est ce qu'a récemment révélé une vaste étude de l'évolution de son génome. En séquençant plus d'un millier de génomes complets de souches de levure prélevées dans le monde entier, Joseph Schacherer, à l'université de Strasbourg, Gianni Liti, à l'université de Nice, et Patrick Wincker, au Genoscope, à Évry, ont montré que si ce champignon unicellulaire a été domestiqué à maintes reprises de façon indépendante, il n'a qu'une seule origine: une souche ancestrale qui prospérait en Chine.

Dès l'aube de la microbiologie moderne, *S. cerevisiae* est devenue un organisme modèle sous l'impulsion de Louis Pasteur. Dans les années 1870, en étudiant la fermentation du vin et de la bière, ce dernier a mis en évidence que la levure est capable de respirer en présence

d'oxygène et de fermenter (et donc produire de l'alcool) en son absence. Et si, dans les années 1960, l'étude de bactéries et de leurs virus a entraîné l'essor de la biologie moléculaire, à partir des années 1990, la levure, une cellule eucaryote (c'est-à-dire à noyau) facile à cultiver en laboratoire, a été essentielle pour, par exemple, comprendre le rôle et la génétique des mitochondries, ces petits compartiments qui fournissent de l'énergie aux cellules à noyau. En 1996, le génome de *S. cerevisiae* fut le premier génome eucaryote à être entièrement séquencé. Or, depuis quelques années, les coûts ont tellement chuté qu'il est possible de séquencer le génome de multiples souches de levure et de les comparer – en d'autres termes d'effectuer une génomique des populations de la levure.

UNE PHYLOGÉNIE DE 1 011 LEVURES!

Un premier projet, le 1000 Fungal Genomes Project, lancé en 2011, a pris pour objectif le séquençage de génomes



Nombre de protéines clés de la biologie humaine ont été découvertes grâce à l'étude de leurs homologues chez la levure.

Sur cette photo prise en microscopie électronique à transmission, de fausses couleurs soulignent l'anatomie de la levure.

EN CHIFFRES

12 millions

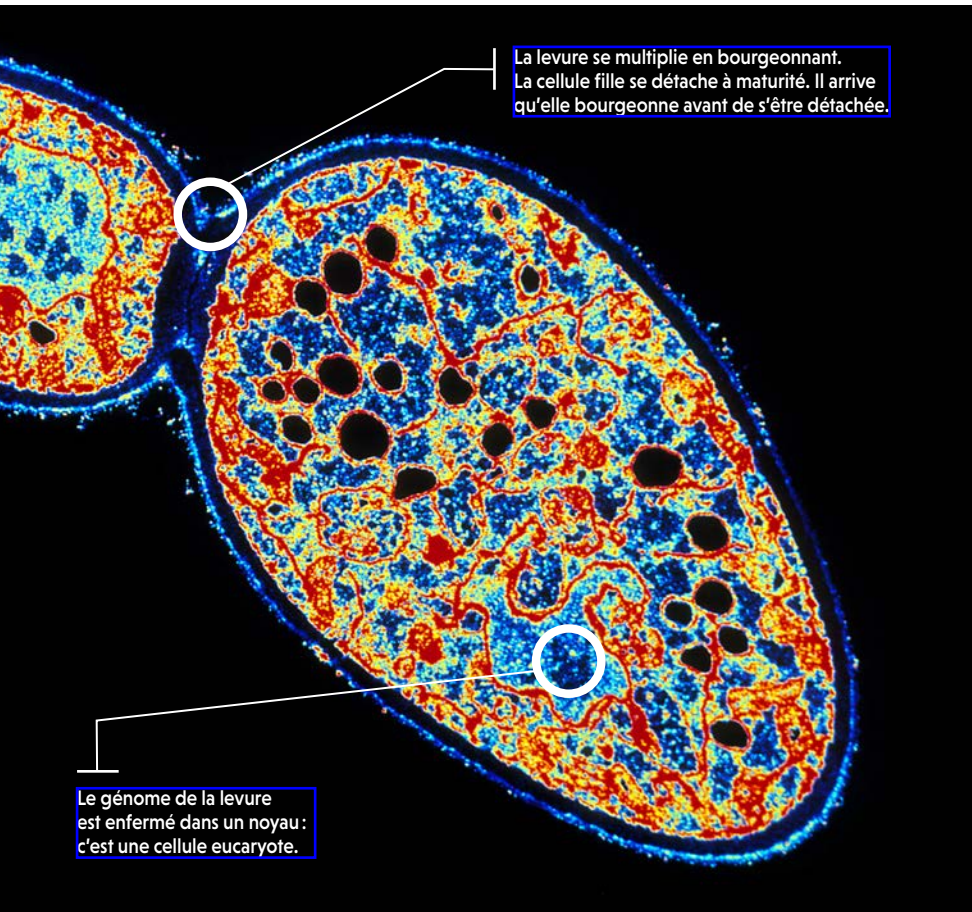
Les 16 chromosomes de la levure *S. cerevisiae* constituent un génome de 12 millions de paires de bases, soit presque trois fois la taille de celui de la bactérie *Escherichia coli*.

2 920

C'est le nombre moyen de générations qu'une levure produit par an, soit environ 8 par jour.

15 000

La levure *S. cerevisiae* serait sortie de Chine il y a environ 15 000 ans. C'est ce qu'ont estimé les chercheurs en testant un modèle d'évolution moléculaire avec leurs données.



structurelles telles que des déplacements de séquences (translocations) ou le changement du nombre de chromosomes. Autant d'indices pour construire une phylogénie. Devant l'ampleur du travail, l'équipe de Joseph Schacherer s'est associée à celles de Gianni Liti et de Patrick Wincker afin de séquencer 1 011 génomes de levures de toutes origines et de traiter *in silico* une telle base de données.

DES COUSINES EN ASIE

La plupart des souches (813) se regroupent en 26 lignées (voir l'encadré page 96). Parmi elles, les souches sauvages et domestiquées sont en général bien séparées, hormis quelques exceptions actuellement incompréhensibles. Ainsi, des levures sauvages vivant sur les chênes méditerranéens se retrouvent parmi les lignées domestiquées, tandis que les souches de la fermentation du saké, toutes issues d'une souche isolée au Japon à la fin du XIX^e siècle, rejoignent les levures sauvages.

Mais le résultat phare apparaît lorsque l'on recherche l'origine de l'espèce *S. cerevisiae*. Pour ce faire, les chercheurs ont construit, en s'appuyant sur un modèle moléculaire décrivant la dynamique temporelle d'évolution de l'ADN, un arbre probabiliste rassemblant toutes les souches de *S. cerevisiae*, ainsi que des

d'espèces proches de la levure et d'autres champignons plus éloignés. Et déjà 800 génomes sont décryptés. Puis en 2013, Joseph Schacherer a décidé de se consacrer à la seule espèce *S. cerevisiae* afin d'en étudier la diversité génétique. Celle-ci se révèle bien plus importante que celle de l'espèce humaine ! Elle est corrélée à la géographie, aux niches environnementales de la levure et à son exploitation comme ferment.

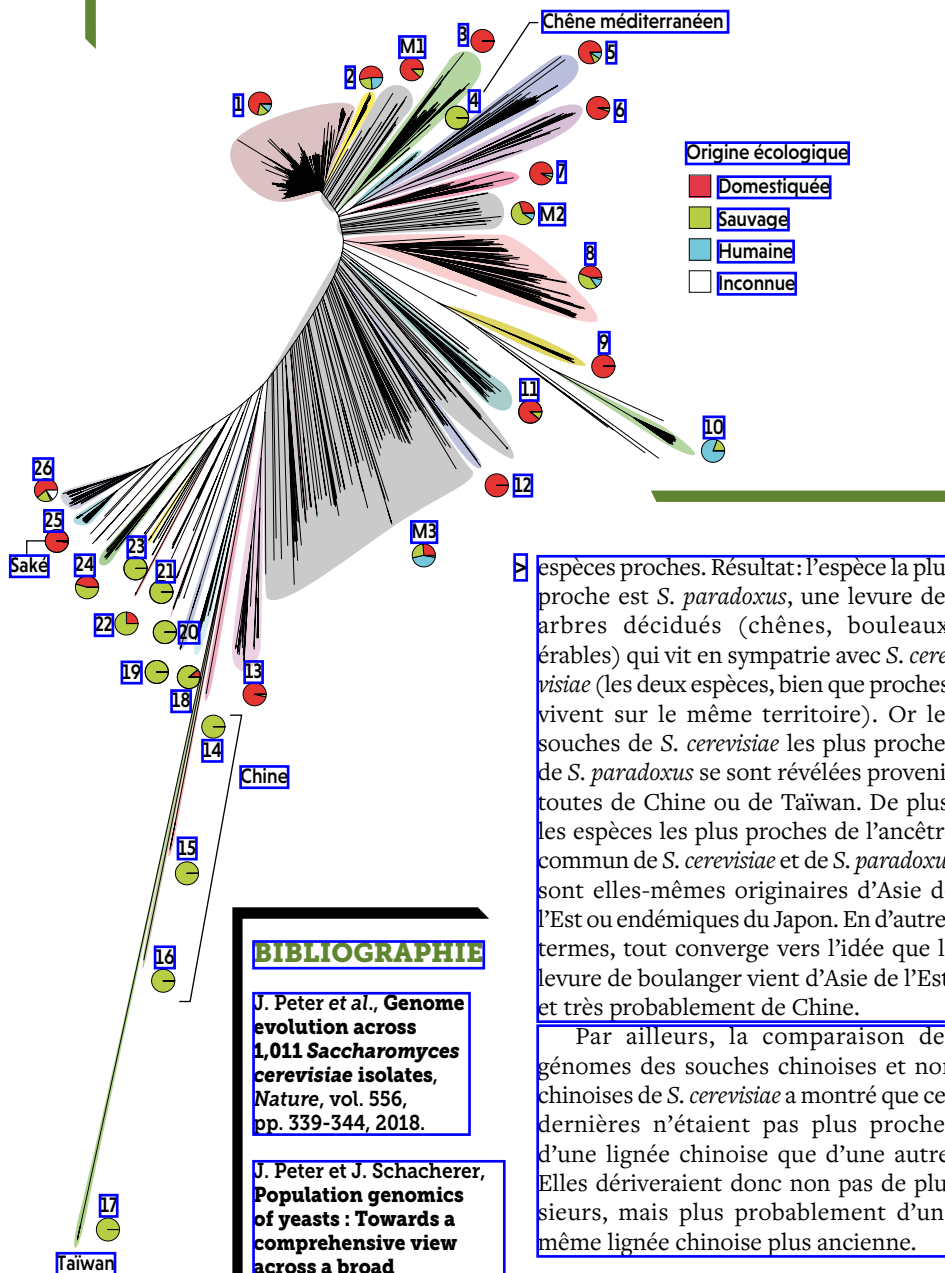
Plusieurs types de modifications génétiques contribuent à créer cette diversité : des variations (polymorphismes) sur des nucléotides isolés (les constituants de l'ADN), des insertions ou pertes (délétions) de séquences, un nombre variable de copies de gènes, des variations



Levure de boulanger (*Saccharomyces cerevisiae*)
Taille : 5 à 10 μm

L'ARBRE DE LA LEVURE

Pour que l'arbre phylogénétique de la levure *S. cerevisiae* soit représentatif de la diversité de l'espèce, les chercheurs ont collecté des souches sur l'ensemble des continents, dans les différentes activités humaines associées (fermentation de produits laitiers, de pain, de vin, de saké, de bière...) et dans les diverses niches écologiques sauvages de la levure (insectes, arbres, fleurs). Dans l'arbre ci-dessous, chaque trait désigne une souche. Plus deux souches sont génétiquement proches, plus leurs traits le sont. On distingue ainsi 26 lignées (numérotées de 1 à 26) et 3 groupes mosaïques inclassables (en gris).



2 espèces proches. Résultat : l'espèce la plus proche est *S. paradoxus*, une levure des arbres décidus (chênes, bouleaux, érables) qui vit en sympatrie avec *S. cerevisiae* (les deux espèces, bien que proches, vivent sur le même territoire). Or les souches de *S. cerevisiae* les plus proches de *S. paradoxus* se sont révélées provenir toutes de Chine ou de Taïwan. De plus, les espèces les plus proches de l'ancêtre commun de *S. cerevisiae* et de *S. paradoxus* sont elles-mêmes originaires d'Asie de l'Est ou endémiques du Japon. En d'autres termes, tout converge vers l'idée que la levure de boulanger vient d'Asie de l'Est, et très probablement de Chine.

Par ailleurs, la comparaison des génomes des souches chinoises et non chinoises de *S. cerevisiae* a montré que ces dernières n'étaient pas plus proches d'une lignée chinoise que d'une autre. Elles dériveraient donc non pas de plusieurs, mais plus probablement d'une même lignée chinoise plus ancienne.

UNE FORTE EMPREINTE DE LA DOMESTICATION

L'origine de la levure est loin d'être la seule information que fournit cette base de données. Ainsi structurée en arbre phylogénétique, elle permettra de suivre pas à pas les diverses domestications, les duplications de gènes et les transferts

horizontaux – en d'autres termes les dynamiques des génomes au sein de l'arbre. On s'aperçoit déjà, par exemple, que la domestication a un effet crucial sur la structure de l'arbre. Des lignées correspondent ainsi aux levures inféodées à des substrats précis : vins européens, bioéthanol brésilien, laiterie française, bière africaine, agave mexicain, cacao africain, vin de palme africain, saké japonais...

La réunion de ces 1011 génomes permet aussi d'établir le pangénome, c'est-à-dire l'ensemble des gènes trouvés chez la levure : on en compte 7796, séparés en 4940 gènes majeurs, dont il n'existe qu'une copie dans le génome et qui régissent les grandes fonctions de la cellule, et 2856 gènes variables, présents souvent en plusieurs copies, jouant un rôle dans les métabolismes secondaires et les réactions aux stress. Les gènes majeurs sont situés au centre des chromosomes, près du centromère, tandis que les gènes variables sont aux extrémités des chromosomes, les télomères. On comprend donc que les échanges se font surtout à ces extrémités.

UNE LEVURE SYNTHÉTIQUE ÉVOLUTIVE

On pourrait aller plus loin encore. Depuis 2011, un projet international, le *Sc2.0 Project*, cherche à synthétiser un génome eucaryote complet, celui de la levure *S. cerevisiae*. Les premiers génomes de synthèse, comme celui du virus de la poliomyélite en 2003 ou celui, près de mille fois plus gros, de la bactérie *Mycobacterium mycoides*, en 2010, étaient déjà des prouesses techniques. Mais dans le projet *Sc2.0*, les chercheurs ont trouvé le moyen de rendre le génome de synthèse capable d'évoluer. Après insertion de sites particuliers près des gènes non essentiels, l'induction du système utilisé, nommé *Scramble*, favorise les translocations, insertions et suppressions de ces gènes. L'objectif ? Trouver le génome minimum autonome.

Mais au-delà de ce génome minimum, la configuration scientifique actuelle est inédite et profondément novatrice. D'un côté, une base de données contenant la variabilité de 1011 génomes de levure, résultat d'histoires évolutives naturelles ou de domestications. De l'autre, un outil moléculaire offrant des génomes synthétiques évolutifs. De là à combiner les deux approches pour imiter en accéléré les longues dynamiques de l'évolution et en décoder les processus, il n'y a qu'un pas. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Peter et al., **Genome evolution across 1,011 *Saccharomyces cerevisiae* isolates**, *Nature*, vol. 556, pp. 339-344, 2018.

J. Peter et J. Schacherer, **Population genomics of yeasts : Towards a comprehensive view across a broad evolutionary scale**, *Yeast*, vol. 33, pp. 73-81, 2016.

J. Dymond, J. Boeke, **The *Saccharomyces cerevisiae* SCRaMbLe system and genome minimization**, *Bioeng. Bugs*, vol. 3, pp. 168-171, 2012.

L'AUTEUR



HERVE THIS
physicochimiste,
directeur du Centre
international de
gastronomie moléculaire
AgroParisTech-Inra, à Paris

POUPÉES RUSSES DE LIQUIDES ET DE SOLIDES

En s'aidant de la congélation,
on peut confectionner des systèmes
composés de couches concentriques
alternativement solides et liquides.



Quand les contrastes sont forts, la perception est stimulée. C'est quand on met du noir sur du blanc que l'on a le plus de contraste visuel, et la musique sait combien le silence est important pour accentuer certaines notes. «Le vase donne sa forme au vide, et la musique au silence», disait Georges Braque.

En cuisine? Pour ce qui est de la consistance, le solide et le liquide font le maximum de contraste. Comment réunir les deux éléments dans une même bouchée? Précédemment, dans le numéro de juillet, nous avons considéré une généralisation des bonbons de chocolat sous le nom de cryptand; mais on peut faire bien mieux. Ce que nous proposons aujourd'hui, c'est de jouer avec du froid pour réaliser un système de sphères emboîtées: du liquide dans du solide, ce solide étant lui-même dans du liquide, etc. Comment y parvenir? Il existe de nombreuses méthodes, mais je vous propose la suivante.

Partons d'un bâtonnet de vanille mis au grand froid, tel celui du congélateur. Quand le bâtonnet est bien refroidi, plongeons-en l'extrémité dans du jus d'orange à la limite de la congélation (on l'aura mis également au congélateur, mais moins longtemps). L'extrémité du bâtonnet se charge de jus d'orange, qui forme alors une mince couche congelée.

Nous remplaçons ensuite le bâtonnet au congélateur pour que cette couche soit non seulement solidifiée, mais aussi très froide. Puis nous ressortirons le bâtonnet et nous le plongerons une deuxième fois dans le jus d'orange à la limite de la congélation, de sorte que, après une

Il est possible de réaliser des «pommes d'amour» qui ressemblent à celles-ci, mais dont l'intérieur est liquide.

succession de tels trempages et de remises au froid, nous obtenions, au bout du bâtonnet, une boule de jus d'orange congelé aussi grosse que souhaité. Quand le système sera finalement terminé et qu'il sera porté à la température ambiante, cette boule redeviendra liquide, formant la sphère interne.

Pour faire une première coque solide, les possibilités sont nombreuses. On utilise souvent le chocolat ou le beurre de cacao fondus pour enrober les glaces. Trempions donc brièvement notre boule de jus d'orange glacée dans du beurre de cacao à la limite de la solidification, c'est-à-dire vers 34°C: le beurre de cacao se solidifie autour du jus d'orange.

Reste à faire la seconde couche sphérique liquide: nous procéderons comme précédemment, avec une alternance de remises au froid et de trempages dans un liquide, jusqu'à obtenir l'épaisseur souhaitée. Il faudra enfin envelopper tout cela dans une couche solide et, là encore, on pourra utiliser le trempage dans le beurre de cacao.

Ce type de manipulations permet de réaliser plus de deux alternances liquide-solide, mais l'utilisation du congélateur est fastidieuse et la production de systèmes emboîtés est longue. On pourrait avec profit se servir d'azote liquide, qui permet des congélations immédiates puisque, au lieu de refroidir à -20°C, on atteint immédiatement la température de -196°C.

Le beurre de cacao n'est pas la seule matière qui forme un solide en refroidissant: les pâtisseries ont ainsi l'habitude d'utiliser des sirops concentrés et, là, on se souviendra utilement que la température de 127,4°C est celle à partir de laquelle un sirop soudainement refroidi fait un système «vitreux», solide et amorphe comme le verre à vitre. ■



LA RECETTE

- 1 Par une alternance de trempages de l'extrémité d'un bâtonnet dans du jus d'orange et de passages au congélateur, former une boule de jus d'orange glacée (on peut aussi aller plus vite en plongeant un bâtonnet dans un compartiment de glaçon où l'on a placé du jus d'orange, et en mettant l'ensemble au congélateur).
- 2 Fondre du chocolat ou du beurre de cacao à la température la plus basse à laquelle la préparation devient liquide.
- 3 Plonger la boule de jus d'orange glacée dans la matière grasse fondue. Alternier des remises au froid et des trempages dans la matière grasse fondue jusqu'à obtenir l'épaisseur de matière grasse fondue souhaitée.
- 4 Plonger l'ensemble dans du jus de mangue refroidi à la limite de la congélation, et alternier des trempages et des passages au congélateur, jusqu'à obtenir une sphère de jus de mangue congelée autour de la première boule.
- 5 Couvrir de beurre de cacao par trempage, comme aux étapes 2 et 3.



Retrouvez tous
nos articles sur
www.pourlascience.fr

P.44

HAFIRS

Ces bassins de captage d'eau ont été construits par les habitants de la cité de Naga, du royaume de Méroé, dans une région aride du Soudan actuel. Le grand *hafir* de Naga a une capacité d'environ quinze piscines olympiques.

P.7

48 000

C'est le nombre de morts prématurées en France en 2017 du fait de la pollution atmosphérique.

A l'échelle mondiale, les estimations sont de l'ordre de 7 millions de personnes décédées.

P.24

« Le développement de l'enseignement de l'informatique aura peut-être un heureux effet secondaire: la diffusion, par porosité, de ses méthodes pédagogiques à d'autres disciplines »

GILLES DOWEK
Chercheur à l'Inria

P.94

2 920

C'est le nombre moyen de générations que produit chaque année une levure *Saccharomyces cerevisiae*, aussi nommée levure de boulanger. Soit environ 8 par jour.

P.68

ALCHIMIE

Newton était fasciné par l'occulte. C'est pour chercher Dieu qu'il s'est intéressé au mouvement des corps célestes, mais aussi à l'alchimie, au secret de la pierre philosophale et de l'élixir de jeunesse. Pour éviter de ternir sa réputation, il cachait ses recherches sulfureuses à presque tout le monde. Il écrivait néanmoins de nombreuses notes sur le sujet.

P.38

LIMITE D'EDDINGTON

Il s'agit du rythme optimal de croissance d'un trou noir qui absorbe de la matière. Le trou noir double alors de masse tous les 10 millions d'années.

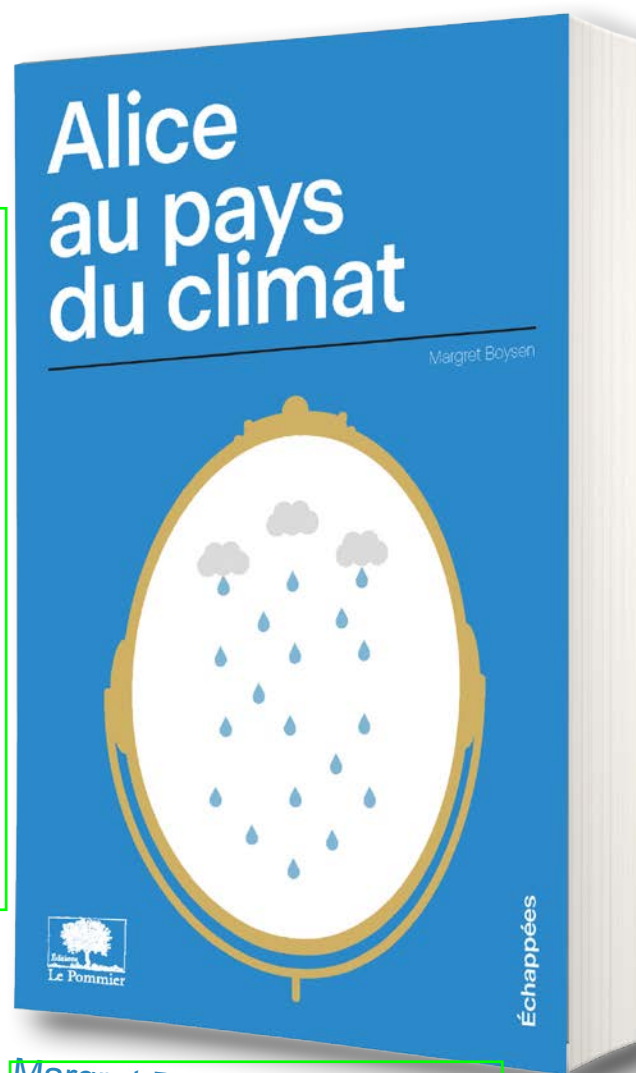
P.26

CROTTIN

Sachant que 200 000 chevaux arpentent les rues de New York au tournant du xx^e siècle et que cet équidé produit en moyenne 11 kilos de crottin par jour, pouvez-vous calculer combien de millions de tonnes d'excréments les autorités new-yorkaises devaient évacuer chaque année?

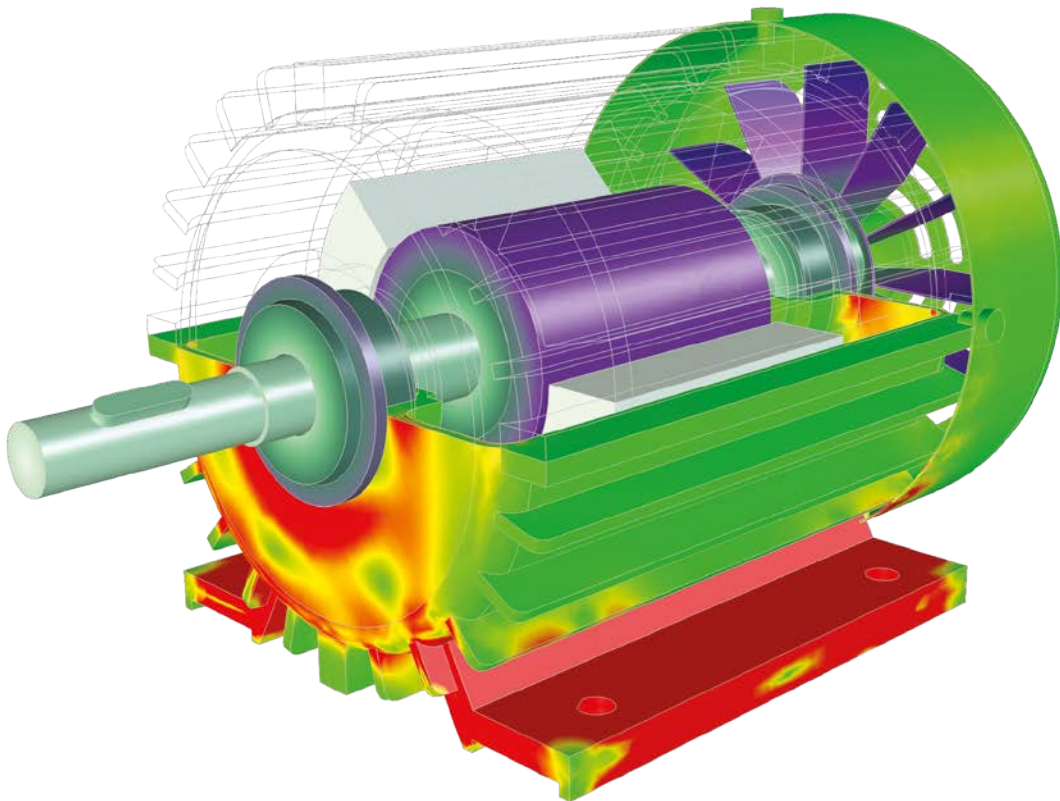
Climat : le pari de l'imaginaire

Quand Alice passe
de l'autre côté du miroir...
c'est pour se retrouver
au cœur des modèles
climatiques !
La fiction
à la rescousse
d'un enjeu de société.



Margret Boysen, 400 p. – 21 €

Inventé au 19^{ème} siècle. Optimisé pour aujourd'hui.



Distribution des contraintes de von Mises dans le carter d'un moteur à induction avec prise en compte des effets électromécaniques.

Au 19^{ème} siècle, deux scientifiques ont inventé séparément le moteur à induction AC. Aujourd'hui, c'est un composant commun en robotique. Comment y sommes nous arrivé, et comment les ingénieurs d'aujourd'hui peuvent-ils continuer d'améliorer ces moteurs?

Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour simuler des produits, des systèmes et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche. Découvrez comment l'appliquer pour vos designs.

comsol.blog/induction-motor