

POUR LA

édition française de Scientific American

SCIENCE

POUR LA SCIENCE

ASTROPHYSIQUE
**QU'Y A-T-IL AU
CŒUR DES ÉTOILES
À NEUTRONS ?**

INFORMATIQUE
**LES CRYPTOMONNAIES
QUI SURPASSERONT
LE BITCOIN**

PHYSIQUE
**COMMENT S'ÉCOULE
UNE SUSPENSION
DE GRAINS**



Maladies, paternité, origines ethniques

FAUT-IL SE FIER AUX TESTS GÉNÉTIQUES?



Découvrez la plus grande aventure humaine



Apollo confidentiel

Lukas Viglietti

Préface de **Charlie Duke**

2019 • 288 pages

9782807323018 • 19€



parution
juin 2019

Les exoplanètes

Flavien Kiefer

Préface d'**Alain Lecavelier des Etangs**

2019 • 192 pages

9782807313316 • 17.90€



L'avenir de l'humanité

Michio Kaku

2019 • 384 pages

9782807322325 • 20€



Histoire de la conquête spatiale

Jean-François Clervoy & Franck Lehot

2019 • 256 pages tout en couleurs

9782807320758 • 25€

vivre sur
Mars ?

Des extraits à feuilleter sur www.deboecksuperieur.com
et des vidéos d'auteurs sur notre chaîne Youtube

deboeck
SUPÉRIEUR **B**

www.pourlascience.fr
70 bis boulevard du Montparnasse - 75014 Paris
Tél. 01 55 42 84 00

Groupe POUR LA SCIENCE
Directrice des rédactions: Cécile Lestienne

POUR LA SCIENCE
Rédacteur en chef: Maurice Mashaal
Rédactrice en chef adjointe: Marie-Neige Cordonnier
Rédacteurs: François Savatier, Sean Bailly

HORS-SERIE POUR LA SCIENCE
Rédacteur en chef adjoint: Loïc Manier

Développement numérique: Philippe Ribeau-Gésippe
Community manager: Aëla Keryhuel

Conception graphique: William Londiche
Directrice artistique: Céline Lapert
Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy, Patrick Cœurui
Révisseuse: Anne-Rozenn Jouble
Marketing & diffusion: Arthur Peys
Chef de produit: Charline Bouché
Direction du personnel: Olivia Le Prévost
Direction financière: Cécile André
Fabrication: Marianne Sigogne et Olivier Lacam
Directeur de la publication et gérant: Frédéric Mérieu
Anciens directeurs de la rédaction: Françoise Pétry et Philippe Boulanger
Conseiller scientifique: Hervé This
Ont également participé à ce numéro: Maud Bruguère, Eric Buffetaut, Pierre-Antoine Defossez, Sophie Gallé-Soas, François Labourie, Tania Louis, Xavier Müller, Christophe Pichon, Pierre Thomas

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

PUBLICITÉ France
Stephanie.jullien@pourlascience.fr

ABONNEMENTS
Abonnement en ligne: <https://boutique.pourlascience.fr>
Courriel: pourlascience@abopress.fr
Tél. 03 67 07 98 17
Adresse postale: Service des abonnements - Pour la Science, 19 rue de l'Industrie, BP 90053, 67402 Illkirch Cedex

Tarifs d'abonnement 1 an (12 numéros)
France métropolitaine: 59 euros - Europe: 71 euros
Reste du monde: 85,25 euros

DIFFUSION
Contact kiosques: À Juste Titres ; Stéphanie Troyard
Tél. 04 88 15 12 48
Information/modification de service/réassort:
www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN
Editor in chief: Mariette DiChristina
President: Dean Sanderson
Executive Vice President: Michael Florek
Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientific American », dans les livres édités par « Pour la Science » doivent être adressées par écrit à « Pour la Science S.A.R.L. », 162 rue du Faubourg Saint-Denis, 75010 Paris.
« Pour la Science S.A.R.L. » Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. » en application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20 rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

Origine du papier: Autriche
Paux de fibres recyclées: 30 %
Eutrophisation ou « Impact sur l'eau »: P. 0,007 kg/tonne



Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
10-31-1282 pefc-france.org



**MAURICE
MASHAAL**
Rédacteur
en chef

L'ABUS DE GÉNÉTIQUE NUIT À LA SANTÉ

Entre l'invention du transistor, en 1947, et la création de Facebook, en 2004, il s'est écoulé à peu près le même nombre d'années qu'entre la détermination de la structure en double hélice de l'ADN (1953) et l'avènement de 23andMe (2006), société de biotechnologie qui propose des tests génétiques aux particuliers. Simple coïncidence ou signe de liens étroits entre la révolution informatique et un

Quoi qu'il en soit, l'irruption récente d'entreprises

qui, moyennant une centaine d'euros et un échantillon de salive, analysent votre génome pour vous renseigner sur vos risques de maladies, vos parents biologiques ou vos origines ethniques est un événement marquant - d'importance peut-être comparable à celle de l'arrivée des « réseaux sociaux » sur Internet. D'où le dossier que nous vous proposons dans ce numéro sur les tests génétiques vendus aux particuliers (voir pages 26 à 38), des tests interdits en France mais autorisés dans d'autres pays.

Comme le montrent les auteurs de ce dossier, ces

développements soulèvent nombre de questions. Outre la fiabilité technique des tests et leur pertinence sur le plan scientifique, plusieurs problématiques d'ordre médical, éthique, juridique, voire politico-économique se font jour. Comme l'absence d'encadrement médical pour les tests ayant trait à la santé, qui a par exemple conduit des femmes à une inutile ablation des seins afin d'éviter un hypothétique cancer. Autre préoccupation majeure: la constitution d'immenses bases de données génétiques aux mains d'intérêts privés, qui font pâlir d'envie les institutions publiques.

Dernier exemple, on peut s'interroger sur la pertinence des tests

relatifs aux origines ethniques. Si le cas d'un suprémaciste blanc découvrant que l'un de ses ascendants était noir peut faire sourire, que penser d'un résultat du type « 35% africain, 30% scandinave, 20% caucasien, 15% indien »? En la matière, il est utile de rappeler que l'identité d'un individu est d'abord celle qu'il se forge, et non celle dont il hérite. Si la notion de liberté individuelle a un sens, c'est aussi celui-là. ■

S

SOMMAIRE

N° 499 /
Mai 2010

ACTUALITÉS

P. 6

ÉCHOS DES LABOS

Une « plante artificielle » respectueuse de l'environnement
L'agriculture a favorisé les sons « f » et « v »
L'étonnante reproduction d'un nematode
Des plasmes géants qui se voient bien
La stratégie du virus en pièces détachées
Comment se ventilent les termitières
Sérotonine et épigénétique
Une tombe étrusque

Aleria

De grandes ères glaciaires d'origine tectonique

P. 18

LES LIVRES DU MOIS

P. 20

LE GÉNÉALOGUE

P. 22

HOMO SAPIENS INFORMATIQUES

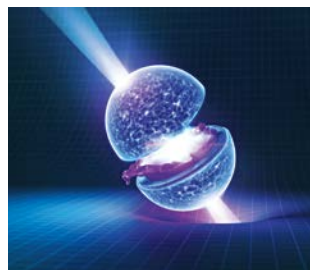
Vers le hardware mou
Gilles Dowek

P. 24

QUESTIONS DE CONFIANCE

Vasarely et l'antibiorésistance
Virginie Tournay

GRANDS FORMATS



P. 40

ASTRONOMIQUE

AU CŒUR DES ÉTOILES À NEUTRONS

Clara Moskowitz

À l'intérieur des étoiles à neutrons règne une densité extrême, parmi les plus élevées de l'Univers. Sous quelle forme la matière s'y trouve-t-elle ? Superfluide de neutrons ? Quarks étranges ? De nouveaux indices éclairent cette vieille énigme



P. 56

ASTRONOMIE

COMMENT S'ÉCOULENT LES GRAINS MÊLÉS À UN FLUIDE

Jean-Yves Delenne, Étienne Guvon et Farhang Radaii

Le sable mouillé ne se comporte pas comme le sable sec. Mais aller au-delà de la simple constatation s'est révélé difficile, et l'écoulement d'une suspension de grains dans un liquide obéit à des lois que les physiciens n'ont caractérisées que récemment.



P. 48

ARCHÉOLOGIE

L'ARCHÉOLOGUE, LE SINGE ET L'OUTIL

Michael Haslam

Plusieurs espèces de singes se servent de pierres pour accéder à certains aliments. Grâce aux traces qu'ils laissent, de tels outils peuvent se révéler dans des fouilles archéologiques... et donner un éclairage nouveau sur l'apparition de la technique au sein des lignées préhumaines.



P. 64

MICROBIOLOGIE

L'ESPRIT D'ÉQUIPE DES MICROBES

Jeffrey Marlow et Rogier Braakman

La loi du plus fort ne prime peut-être pas chez les microorganismes. Au contraire, la coopération entre espèces serait fréquente. Au point d'influer sur le climat.



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



En couverture:

© Adobe stock/Eisenhans

Les portraits des contributeurs ont été réalisés par Seb Jarnot

Ce numéro comporte un encart exceptionnel First Voyages sur une sélection d'abonnés en France métropolitaine.



P. 74

HISTOIRE DES SCIENCES

LE MONDE SELON JACQUES DEVAULX

Élisabeth Hébert

En 1583, un jeune pilote et cartographe rassembla, dans un magnifique manuscrit enluminé, toute la science de la « navigation aux étoiles » de son temps, de l'art de se repérer en mer aux cartes les plus récentes du monde.

P. 26

GÉNÉTIQUE

MALADIES PATERNITÉ ORIGINES ETHNIQUES

FAUT-IL SE FIER AUX TESTS GÉNÉTIQUES?

Élisabeth Hébert



Crachez dans le tube et renvoyez le kit au laboratoire, nous vous révélerons ce que votre ADN dit de vous. Ainsi vantés par les entreprises qui les vendent, les tests génétiques paraissent simples et fiables. Pourtant...

RENDEZ-VOUS

P. 80

LOGIQUE & CALCUL

AU-DELÀ DU BITCOIN

Jean-Paul Delahave

L'idée des cryptomonnaies, concrétisée pour la première fois avec le bitcoin, a donné naissance à une industrie foisonnante et variée, qui propose nombre d'améliorations.



P. 86

ART & SCIENCE

Le colibri, les dents de la guerre

Loïc Mangin

P. 88

DÉES DE PHYSIQUE

Des salles qui résonnent

Jean-Michel Courty

et Édouard Kierlik

P. 92

CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION

Comment une blatte devient zombie

Hervé Le Guyader

P. 96

SCIENCE & GASTRONOMIE

Quatre goûts successifs et plus

Hervé This

P. 98

À PICORER

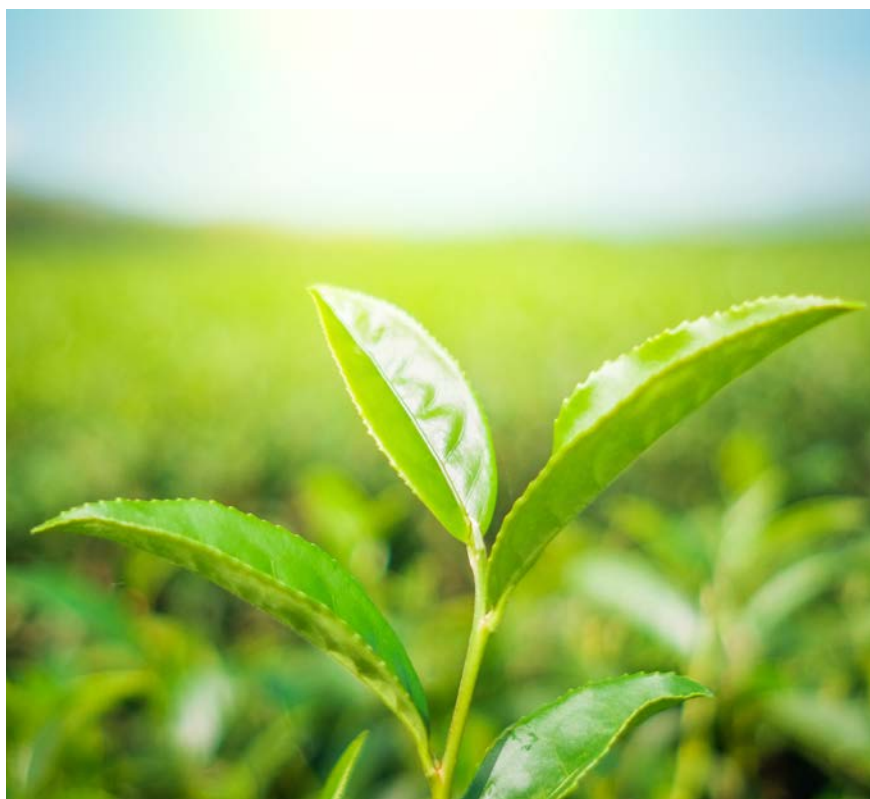
A

CTUALITÉS

2.6 Echos des labos
2.18 Livres du mois
2.20 Agenda
2.22 Homo sapiens informaticus
2.24 Questions de confiance

De nombreuses équipes dans le monde cherchent à imiter la photosynthèse des plantes et ainsi produire des carburants à partir du CO₂ de l'atmosphère et de l'énergie solaire.

UNE « PLANTE ARTIFICIELLE » RESPECTUEUSE DE L'ENVIRONNEMENT



Un dispositif développé au Collège de France utilise la lumière du soleil pour transformer le CO₂ en carburants – à l'aide de matériaux abondants, bon marché et peu polluants.

Face à la crise climatique et aux concentrations toujours plus importantes de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, comment produire de l'énergie en limitant l'impact sur l'environnement? Les plantes sont une

photosynthèse, elles retirent du dioxyde de carbone (CO₂) de l'air et le transforment en matière organique, en utilisant de l'eau et la lumière du soleil. L'idée serait d'imiter artificiellement ce principe pour tendre vers une économie en cycle fermé où le dioxyde de carbone émis dans

l'atmosphère du fait des activités humaines serait capté pour refaire des carburants ou d'autres composés utilisés par l'industrie. Depuis quelques années, les chercheurs ont développé des dispositifs performants, mais ces approches nécessitent souvent des matériaux rares, coûteux et polluants. L'équipe de Marc Fontecave, professeur au Collège de France, vient de développer un nouveau système, peu coûteux, utilisant des matériaux abondants sur la planète et présentant un rendement intéressant.

Chez les plantes, le principe est simple: la lumière solaire sert de source d'énergie et l'eau apporte des électrons

pour convertir le dioxyde de carbone en matière organique, notamment des sucres. Mais comme la chaîne des réactions chimiques sous-jacente est complexe, le rendement de conversion de l'énergie solaire en matière organique est le plus souvent inférieur à 1% pour la plupart des plantes, et atteint 3 à 4% pour les microalgues les plus efficaces.

Dans un dispositif artificiel inspiré des plantes, une cellule solaire convertit l'énergie du soleil en courant électrique. Ce dernier alimente une cellule électrochimique qui oxyde l'eau (et produit du dioxygène et des ions hydrogène) sur une électrode et réduit le dioxyde de carbone sur l'autre. Sur celles-ci, grâce à l'apport d'ions hydrogène et d'électrons, le dioxyde de carbone se transforme en divers composés: monoxyde de carbone, méthanol, méthane, etc.

L'agriculture a favorisé les sons « f » et « v »

On pensait que la diversité phonétique des langues était figée depuis l'apparition de l'homme et la formation de son conduit vocal. De nouveaux travaux montrent que certains sons seraient plus récents et liés à l'émergence de l'agriculture et d'une alimentation plus molle. Dan Dediu a participé à cette étude et nous explique ces résultats.



Propos recueillis par SEAN BAILEY

DAN DEDIU
Chercheur au laboratoire
Dynamique du langage,
à l'université Lumière,
à Lyon

Comment cette étude a-t-elle commencé ?

En 1985, le linguiste américain Charles Hockett avait observé que les sons « f » et « v » étaient surtout présents chez les populations agricoles et absents chez les chasseurs-cueilleurs. Il n'avait pas à l'époque les outils statistiques pour aller au-delà de la constatation et étudier le lien avec l'alimentation. Nous étions initialement plutôt réservés à-dessus, mais nous avons voulu en savoir plus en utilisant les outils statistiques modernes et maintenant très utilisés en linguistique. Et nous avons effectivement noté une corrélation significative entre l'utilisation des consonnes labiodentales (comme « f » et « v ») et la pratique de l'agriculture. Par exemple, ces sons sont presque inexistant chez des populations qui avaient jusqu'à récemment un mode de vie de chasseurs-cueilleurs, comme en Afrique du Sud, en Australie ou au Groenland.

Quel serait le rôle de l'alimentation sur la prononciation des consonnes labiodentales ?

Avec le développement de l'agriculture, on est passé d'une alimentation transformée et plus molle. Par exemple, du pain nécessite beaucoup moins de mastication que des racines. On observe une forte usure des dents chez les chasseurs-cueilleurs. Cela a une conséquence sur le positionnement des incisives. Chez tous les enfants, les incisives du haut sont un peu en avant des dents du bas, ce que l'on retrouve chez les adultes des populations pratiquant l'agriculture. Mais chez les chasseurs-cueilleurs adultes, divers mécanismes compensent l'usure, et ils se retrouvent avec des incisives du haut alignées sur celles du bas. Cela influe sur la prononciation de certains sons.

Comment avez-vous confirmé ce scénario ?

Nous avons développé un modèle biomécanique des structures orofaciales et des muscles en utilisant une plateforme de modélisation nommée ArtiSynth. Nous avons comparé l'effort à fournir pour prononcer une consonne labiodentale quand les incisives se touchent ou non. La force musculaire nécessaire s'est révélée 29 % plus faible quand les incisives sont décalées. Dès lors, l'utilisation de ces sons chez les chasseurs-cueilleurs semble moins probable que chez ceux pratiquant l'agriculture.

Vous avez aussi effectué une analyse des parentés linguistiques ; avec quels résultats ?

Nous avons analysé l'émergence des consonnes labiodentales au cours de l'histoire des langues indo-européennes. Cette famille a l'avantage d'être très diversifiée et géographiquement étendue. En outre, son évolution est relativement bien comprise et documentée. Nous avons construit un arbre de parenté probabiliste des sons dans les langues de cette famille. Compte tenu des incertitudes, nous montrons que les consonnes labiodentales ont commencé à apparaître il y a entre 3 500 et 6 000 ans et que leur fréquence a rapidement augmenté il y a 2 500 ans. Une évolution cohérente avec celle de l'agriculture et de la généralisation de la nourriture transformée dans cette aire géographique.

Que conclure sur la diversité phonétique des langues ?

Notre étude pluridisciplinaire suggère fortement que cette diversité n'est pas apparue et ne s'est pas figée lors de l'émergence de *Homo sapiens* il y a 300 000 ans. Elle a évolué et, chose étonnante, pour une raison non pas génétique, mais culturelle : la naissance de l'agriculture, qui a entraîné un changement de nature morphologique, portant sur la disposition des dents.

D. E. Blasi *et al.*, *Science*, vol. 363, article eaav3218, 2015

Les dispositifs existants font appel à des métaux rares, chers et parfois toxiques : des cellules photovoltaïques de silicium dopé avec de l'indium, du gallium et de l'arsenic, par exemple, ou des électrodes en iridium. Or pour développer des « plantes artificielles » à une échelle industrielle, il faut à la fois de bons rendements pour les cellules solaires et les cellules d'électrolyse, mais aussi des matériaux abondants et peu coûteux, tant pour les cellules solaires que pour les électrodes.

C'est le cahier des charges que se sont fixé Marc Fontecave et ses collègues. Ils ont développé un système où les deux électrodes de la cellule électrochimique sont en cuivre et recouvertes d'une couche d'oxyde de cuivre (CuO). Elles peuvent à la fois oxyder l'eau et réduire le CO₂. En outre, le phénomène de transfert de matériau d'une électrode à l'autre que l'on a dans les cellules électrochimiques n'est ici pas un problème, les électrodes étant de même nature. Pour optimiser la circulation des différents composés et les réactions aux électrodes, la surface de ces dernières présente une structure poreuse, avec des cavités de 50 micromètres. De plus, les parois sont nanostructurées avec des dendrites, des petites épines, qui augmentent la surface effective des électrodes.

La réduction du CO₂ en hydrocarbures atteint, dans l'électrolyseur, un rendement de 21 % et produit, comme composés majoritaires, de l'éthylène et de l'éthane. En associant ce dispositif à des cellules solaires à pérovskites (à base de dioxyde de titane), qui ont un excellent rapport coût-efficacité, on obtient un rendement énergétique total en hydrocarbures de 2,3 %. Un résultat exceptionnel compte tenu des contraintes sur les matériaux utilisés.

C'est un pas important vers le développement de « plantes artificielles » plus respectueuses de l'environnement. « Sur l'échelle TRL de maturité technologique qui va de 1 à 9 (et où 9 correspond à la mise sur le marché), notre dispositif est à un niveau compris entre 3 et 4, ce qui est assez rare dans le monde académique », souligne Marc Fontecave. Des industriels sont déjà intéressés par ce projet. Les chercheurs espèrent encore améliorer leur dispositif. « La clé, c'est le catalyseur, indique Marc Fontecave ; en l'optimisant, nous pourrions augmenter le courant (qui contrôle la vitesse des réactions) et le rendement. »

SEAN BAILEY

J. H. Huan *et al.*, *PNAS*, en ligne le 27 mars 2019

BIOLOGIE ANIMALE

L'ÉTONNANTE REPRODUCTION D'UN NÉMATODE

Chez le ver rond *Mesorhabditis belari*, la reproduction sexuée est rare et ne donne que des mâles. Et la parthénogenèse, qui produit des clones de la mère, exige tout de même un mâle

La reproduction de ces petits vers ronds vivant dans les sols intriguait déjà dans les années 1920. À l'époque, les biologistes avaient remarqué que le nématode *Mesorhabditis belari* avait la capacité d'utiliser ou non le matériel génétique des mâles

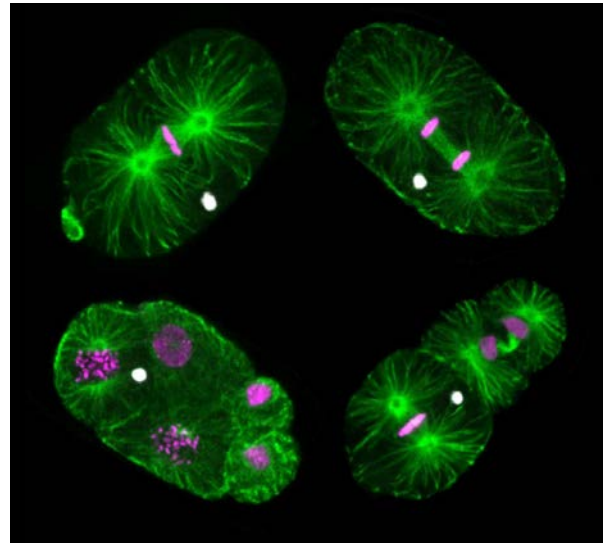
sexuée ou asexuée. Cependant, leurs observations n'avaient pas mis en évidence à quel point la reproduction de cette espèce est spéciale. L'équipe de Marie Delattre, de l'université de Lyon, vient en effet de montrer que chez ce nématode, non seulement les deux modes de reproduction coexistent, mais, tandis que la parthénogenèse produit des femelles, clones de leurs mères, la reproduction sexuée, elle, ne produit que des mâles. Encore plus intrigant, la parthénogenèse ne peut avoir lieu qu'après une fécondation : les mâles sont donc nécessaires pour produire les clones maternels, mais leur ADN n'est pas utilisé.

« D'autres espèces, comme certains poissons, présentent aussi une parthénogenèse dite sperme-dépendante, explique Marie Delattre. Mais ces espèces ne produisent pas de mâles, ou ceux-ci sont infertiles. La fécondation est alors assurée par des mâles d'espèces voisines. » La grande nouveauté est donc d'avoir trouvé dans un tel mécanisme l'implication de mâles fertiles de la même espèce.

Par des expériences d'imagerie sur un grand nombre de nématodes, les chercheurs ont précisé les mécanismes en jeu. Dans le cas où l'ADN masculin n'est pas utilisé pour former l'embryon, la fécondation reste indispensable car le spermatozoïde apporte un centrosome, une structure de la cellule qui permet à un réseau de microtubules de se former. Ce réseau de « rails cellulaires » est nécessaire aux divisions cellulaires successives qui vont former l'œuf. « Le fait que l'ovule ait besoin de l'apport des centrosomes des mâles constitue une contrainte pour garder les mâles », note Marie Delattre.

Le spermatozoïde déclenche aussi la dernière étape de la méiose de l'ovule comme dans le cas général, mais cette dernière est incomplète : l'ovule reste diploïde (avec deux exemplaires de chaque chromosome), au lieu de se

Images d'embryons du nématode *Mesorhabditis belari* à différentes étapes des divisions cellulaires. Le cytosquelette est coloré en vert, l'ADN de la mère en rose. L'ADN du père (en blanc) n'est pas intégré aux noyaux des cellules de l'embryon.



9 %

C'EST LA PROPORTION DE MÂLES DANS LA POPULATION DES NÉMATODES EN QUESTION. UN MODÈLE ISSU DE LA THÉORIE DES JEUX A MONTRÉ AUX CHERCHEURS QUE C'EST LE RAPPORT MÂLES-FEMELLES OPTIMAL POUR QU'IL Y AIT ASSEZ DE « FILS » DE FAÇON À FÉCONDER TOUTES LES « FILLES » D'UNE FEMELLE FONDATRICE.

scinder en deux et d'accueillir l'ADN du spermatozoïde.

Etonnamment, les individus issus d'une « vraie » fécondation, avec mélange des ADN parentaux, sont tous mâles, car ils héritent d'un spermatozoïde portant le chromosome Y. *In fine*, la proportion de mâles est de 9 % dans la population de ces nématodes. Les chercheurs ont montré que ce rapport mâles-femelles permet à l'espèce de ne pas avoir à chercher de mâles parmi d'autres espèces pour la parthénogenèse sperme-dépendante, ce qui mettrait les femelles en concurrence avec celles d'autres espèces.

Les chercheurs essaient maintenant de comprendre comment l'espèce est passée d'une reproduction sexuée classique, dont la présence a été démontrée chez l'ancêtre de ce nématode, à ce mode de reproduction. La parthénogenèse est-elle venue contrebalancer le biais de la reproduction sexuée en faveur de la production d'une descendance mâle ou, à l'inverse, est-elle apparue avant ce biais ? Par ailleurs, on considère souvent la stratégie parthénogénétique comme de court terme. La dynamique du génome de cette espèce, sans brassage génétique, est-elle compatible avec un maintien sur le long terme ? ■

NOËLLE GUILLON

A. A. Chiarenza et al., *Nature Communications*, vol. 10, article 1091, 2019

METHANE SUR MARS
CONFIRMÉ

Depuis les premiers indices de la présence de méthane dans l'atmosphère martienne, obtenus en 2004, la fiabilité de ces mesures difficiles était discutée. Grâce à une nouvelle analyse des données de la sonde Mars Express, Marco Giuranna, de l'institut italien d'astrophysique, à Rome, et ses collègues ont confirmé la façon indépendante la mesure, en juin 2013, d'un pic de méthane par le rover Curiosity. Reste à comprendre l'origine de ce gaz.

L'ARMÉE DE TERRE...
DÉTENTE EN 2013

Dans le mausolée de l'empereur Qin, la nef de terre cuite verte, protégée par une couche micrométrique de chrome, les armes de bronze n'ont pas subi de corrosion en plus de deux mille ans. On a longtemps pensé qu'il s'agissait d'une technique des artisans chinois contre la corrosion. En analysant la répartition du chrome sur les armes, Marcos Martín-Torres, de l'université de Cambridge, et ses collègues suggèrent qu'il s'agirait plutôt d'une contamination involontaire du métal contenu dans la laque utilisée sur d'autres parties des statues.

CHLOROPHYLLE SANS
PHOTOSYNTHESE

Les apicomplexes sont des parasites unicellulaires, à l'instar des agents du paludisme ou de la toxoplasmose. Mais, comme leurs ancêtres, ils tiraient leur énergie de la photosynthèse, comment ces organismes ont-ils évolué vers le parasitisme ? L'équipe de Patrick Keeling, de l'université de la Colombie-Britannique, au Canada, a découvert les apicomplexes présents dans 70 % des coraux marins, les corallacolidés, qui donnent un élément de réponse. Ces parasites présentent encore les gènes nécessaires à la synthèse de la chlorophylle, mais pas ceux codant les protéines liées à la photosynthèse.

PAS DE DÉCLIN
CHEZ LES DINOS

L'extinction brutale des dinosaures s'est produite il y a environ 66 millions d'années, à la suite de l'impact d'un astéroïde.

Certains pensent que ces animaux étaient déjà en déclin avant leur disparition soudaine, déclin qui serait lié aux importants changements climatiques qui ont marqué les derniers millions d'années de règne des dinosaures. Dans une nouvelle étude, l'équipe d'Alfio Alessandro Chiarenza, de l'Imperial College, à Londres, suggère que le scénario du déclin serait erroné.

L'hypothèse du lent crépuscule des dinosaures s'appuie en partie sur les archives fossiles disponibles en Amérique du Nord ainsi que sur des modèles mathématiques qui indiquent un appauvrissement de la diversité des espèces lors du Crétacé tardif.

Il faut noter que le registre fossile est principalement localisé dans la partie occidentale du continent nord-américain, où les conditions étaient propices à la fossilisation du fait d'une grande abondance de sédiments. Ces derniers permettent un enfouissement rapide des cadavres. Pour ne pas se limiter aux seules informations du registre fossile, Alfio Alessandro Chiarenza et ses collègues ont utilisé la méthode de modélisation des niches écologiques. Ils



Que s'est-il passé avant la catastrophe de la fin du Crétacé : le déclin des dinosaures ou fossilisation plus difficile ?

ont déterminé les conditions environnementales, telles que les températures et le volume des précipitations, dont a besoin chaque espèce de dinosaure pour survivre. Puis, en utilisant des modèles qui reconstituent le climat passé sur le continent nord-américain, ils ont cartographié les habitats remplissant les critères des niches écologiques de chaque espèce. Ils ont montré que ces habitats étaient nombreux en Amérique du Nord à la fin du Crétacé, mais qu'ils correspondaient à des régions peu propices à la fossilisation. Cela expliquerait la baisse du nombre de fossiles, attribuée à tort à un déclin. ■

WILLIAM ROWE-PIRRA

A. A. Chiarenza et al., *Nature Communications*, vol. 10, article 1091, 2019

DES NEURONES SE CRÉENT
À TOUT ÂGE

Vous avez plus de 85 ans ? Pas de problème. Vous pouvez encore fabriquer des neurones frais comme des...

Cerveau essentielle au fonctionnement de la mémoire et du repérage dans l'espace, l'hippocampe. Elena Moreno-Jiménez, de l'université autonome de Madrid, et ses collègues ont analysé des échantillons de cerveaux *post mortem* chez des sujets âgés de 43 à 87 ans, en repérant la formation des jeunes neurones grâce à un procédé qui traque une protéine exprimée uniquement par les neurones immatures. Résultat : des milliers de neurones nouveau-nés détectés dans le cerveau... des personnes âgées.

En utilisant la même méthode sur le cerveau de patients décédés et atteints de la

maladie d'Alzheimer, l'équipe espagnole a constaté que la production de nouveaux neurones dans l'hippocampe était très réduite, voire absente. Autrement dit, les difficultés de mémoire, de plasticité cognitive ou de repérage dans l'espace pourraient résulter de cette panne de production. Celle-ci semble intervenir alors même que les fameuses plaques amyloïdes, qui font tant de mal aux neurones existants, ne sont pas encore très répandues. La baisse de production serait un facteur à prendre au sérieux pour expliquer le développement de la maladie. Et une piste thérapeutique efficace pourrait consister à relancer le processus. ■

SÉBASTIEN BOHLER

E. Moreno-Jimenez et al., *Nature Medicine*, en ligne le 25 mars 2019

DES PHASMES GÉANTS QUI SE VOIENT BIEN

Les phasmes, ces insectes dont la forme fait penser à une brindille, à une ronce ou à une écorce sont à l'évidence des as du camouflage. Aussi, la description par l'équipe de Frank Glaw, de la Collection zoologique de la Bavière, à Munich, de deux nouvelles espèces malgaches, *Achrioptera manga* et *Achrioptera maroloko*, ne passe pas inaperçue: non seulement ces deux phasmes sont parmi les insectes les plus grands, mais leurs mâles, loin d'être camouflés, arborent des couleurs vives.

Les mâles de ces deux espèces particulières d'*Achrioptera* – le genre contient une douzaine d'espèces, toutes africaines – que sont *A. manga* et *A. maroloko* ne font clairement pas appel au camouflage: les premiers sont d'un bleu intense et ont du jaune sur leurs pattes (*en haut*), tandis que les seconds attirent l'œil par leur corps jaune assorti d'ailes noires (*ci-contre*). Dès lors, comment échappent-ils aux oiseaux et autres insectivores?

Frank Glaw propose une explication évolutive. Comme cela se rencontre par exemple chez certaines grenouilles sud-américaines, les très vives couleurs des mâles de ces deux espèces de phasme pourraient signifier: «Attention, je suis hautement toxique!» On parle dans ce cas d'aposématisme. L'une des possibilités est que les lignées d'*A. manga* et d'*A. maroloko* ont évolué de telle façon que les mâles auraient peu à peu acquis une immunité aux poisons contenus dans des plantes qu'ils consomment, des poisons qui déclencheraient leur coloration. Les femelles de ces deux espèces, qui, en revanche, sont restées naturellement camouflées, pourraient avoir sélectionné cette défense antiprédateur particulière en préférant systématiquement s'accoupler à des mâles colorés. Un cas possible, donc, de femelles préférant les mâles toxiques... enfin, pour d'autres! ■

FRANÇOIS SAVATIER

Frank Glaw et al., *Frontiers in Ecology and Evolution*, en ligne le 2 avril 2019





VIROLOGIE

LA STRATÉGIE DU VIRUS EN PIÈCES DÉTACHÉES

Le virus FBNSV, dont le génome est scindé en huit segments, colonise son hôte, une légumineuse, en confiant la lecture de chaque segment à une cellule différente

Le puceron s'installa sur la tige de la fève et se mit à aspirer sa sève. Emporté par les mouvements du fluide, le virus FBNSV quitta la trompe de l'animal et s'infiltra dans la plante, qu'il commença immédiatement à coloniser. Oui, mais comment ? Dans

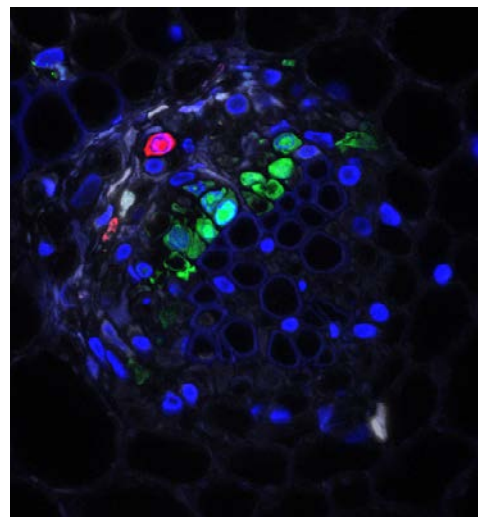
le virale contient tout le matériel génétique du virus et se duplique en trompant une cellule hôte, laquelle se met alors à lire son génome et à produire de nouvelles particules virales.

Mais le virus FBNSV, responsable d'une maladie des légumineuses, a la particularité d'être multipartite: son génome est scindé en plusieurs segments – huit exactement – chacun porté par une particule virale différente, et il a besoin du matériel codé sur ces huit segments pour se propager. Or s'il doit attendre qu'un exemplaire de chaque segment infecte une même cellule de la fève, ses chances sont très faibles. De nombreux virus multipartites sont connus depuis les années 1960, mais personne n'avait résolu cette énigme, jusqu'aux derniers travaux d'Anne Sicard et ses collègues, dans l'équipe de Stéphane Blanc, à l'Inra de Montpellier.

Les biologistes ont d'abord confirmé, à l'aide de marqueurs fluorescents, que les différents segments du génome viral sont rarement présents en même temps dans une même cellule de la plante infectée. Au contraire, les segments semblent s'accumuler dans les cellules de façon totalement indépendante, y compris parfois d'entre eux qui codent chacun une fonction essentielle du virus: la réplication de son ADN, son encapsulation dans une coque (capside) et le déplacement de la particule virale.

En d'autres termes, il est peu probable qu'une cellule infectée dispose du matériel viral nécessaire pour produire de nouvelles particules virales. Sauf si, d'une façon ou d'une autre, le matériel codé par un segment et exprimé dans sa cellule hôte circule d'une cellule à l'autre. Pour rechercher un tel phénomène, Stéphane Blanc et ses collègues ont examiné si les cellules capables de répliquer le segment d'encapsulation contenaient à la fois le segment de réplication et la protéine qu'il code (nommée M-Rep), ou seulement la

Marqués chacun à l'aide d'une molécule fluorescente, deux segments différents du génome du virus FBNSV (en vert et en rouge) apparaissent localisés dans des cellules différentes de la plante hôte (en bleu).



17 %

DE TOUTES LES SORTES DE VIRUS CONNUS SONT MULTIPARTITES. CETTE PROPRIÉTÉ LEUR CONFÉRERAIT DONC UN AVANTAGE ÉVOLUTIF, MAIS LEQUEL ? LA QUESTION RESTE OUVERTE...

protéine. Résultat: si le segment de réplication n'était présent que dans environ 40% des cellules, la protéine M-Rep en occupait, elle, près de 85%. La protéine (ou son ARN messager, un intermédiaire de fabrication) était donc capable de quitter la cellule qui l'avait produite (cellule avec segment de réplication) et d'entrer dans une autre.

La force du virus FBNSV réside donc dans la capacité des produits de ses gènes à se déplacer d'une cellule à une autre. Comment ? La question reste entière, mais les chercheurs soupçonnent chaque segment d'avoir sa propre méthode, qu'il s'agit à présent de mettre au jour. Et ce n'est pas leur seule interrogation. Par exemple, comment le virus passe-t-il du puceron à la plante ? En 2018, la même équipe a en effet montré que le nombre de particules virales transmises par un puceron est, pour certains segments du génome, si faible qu'il faudrait qu'une centaine de pucerons infectés inoculent le virus à la même plante pour que tous les segments soient injectés. Or tous les pucerons étant loin d'être infectés, la probabilité qu'une telle avalanche d'attaques se produise est infime... Les virus multipartites sont décidément loin d'avoir révélé tous leurs mystères. ■

MARIE-NEIGE GORDONNIER

A. Sicard et al., eLife, article e43599, 2019; R. Gallé et al., Journal of Virology, vol. 92(14), article e00139-18, 2018

MATHÉMATIQUES

33 EST LA SOMME DE TROIS CUBES

À l'exception de ceux dont le reste de la division par 9 est 4 ou 5, tous les nombres entiers positifs peuvent-ils être exprimés comme la somme de trois cubes (positifs ou négatifs) au cube? Faute de démonstration, les mathématiciens cherchent des solutions au cas par cas, surtout pour les entiers inférieurs à 100. Et la tâche n'est pas toujours évidente.

Certaines solutions sont simples, à l'image de $29 = 3^3 + 1^3 + 1^3$, mais dans d'autres cas les solutions impliquent des nombres gigantesques. Grâce à un algorithme optimisé et un supercalculateur, Andrew Booker, de l'université de Bristol, a obtenu une solution pour le nombre 33: il est égal à $8866128975287528^3 + (-8778405442862239)^3 + (-2736111468807040)^3$. Parmi les entiers positifs inférieurs à 100, il ne reste plus qu'un cas à résoudre: 42! ■

S.B.

A. R. Booker, en ligne le 11 mars 2019
<https://arxiv.org/abs/1903.04284>

BIOPHYSIQUE

COMMENT LES TERMITIÈRES SE VENTILENT



Dans les termitières (ici en Australie), la concentration de dioxyde de carbone et la température sont finement régulées.

PHYSIQUE

PIÈGE À ROSÉE AMÉLIORÉ

Une façon de collecter la rosée est d'utiliser des surfaces inclinées. Mais il faut amener les gouttes à se former et glisser.

elles fasse s'évaporer. Daniel Beysens, de l'ESPCI, et ses collègues ont microstructuré des surfaces avec des stries: les gouttes grossissent et glissent alors plus vite que sur une surface lisse.

Lorsque l'humidité se condense sur une surface lisse, elle forme d'abord de petites gouttes, qui fusionnent avec leurs voisines pour former de plus grandes gouttes, lesquelles finissent par glisser. Sur leur surface striée, les chercheurs ont observé que les rainures canalisent l'eau, qui forme des filaments reliant des gouttes même éloignées. Quand cela se produit, les petites gouttes se vident dans les plus grosses. Grâce à cette interaction à distance, les grosses gouttes grandissent plus vite, débordent sur plusieurs rainures et se connectent sur de nouveaux filaments, ce qui accélère d'autant leur croissance. Une solution simple, robuste et peu coûteuse. ■

S.B.

C.-B. Bintein et al., Phys. Rev. Lett., vol. 122, 098005, 2019

Les termites sont des bâtisseurs hors pair. Dépasseant parfois plusieurs mètres de hauteur, les termitières sont des structures où la température, l'humidité et la concentration de gaz, dont le dioxyde de carbone, sont finement régulées. Guy Theraulaz, du Centre de recherches sur la cognition animale, à Toulouse, et ses collègues ont analysé des parois de nids pour mieux comprendre comment s'opère cette régulation.

Les chercheurs ont étudié deux termitières, *Trinervitermes germinatus*, l'une au Sénégal et l'autre en Guinée. Ils ont d'abord numérisé la structure interne des habitats, à l'aide d'un scanner aux rayons X, puis ils ont examiné les parois plus en détail en analysant des échantillons par microtomographie aux rayons X. Ces parois présentent des pores de tailles comprises entre quelques micromètres et la centaine de micromètres. Les pores de grande taille sont interconnectés, ce qui augmente la perméabilité des parois et donc les échanges gazeux entre l'intérieur du nid et l'extérieur.

Grâce à une simulation en 3D des écoulements d'air dans la termitière, Guy Theraulaz et ses collègues ont confirmé que la porosité des parois joue bien un rôle crucial dans l'évacuation du dioxyde de carbone. Par ailleurs, comme les pores sont remplis d'air et que celui-ci est un bon isolant thermique, les parois assurent aussi la thermorégulation de la termitière. La diffusion de la chaleur du soleil vers l'intérieur de la structure est réduite, ce qui évite la surchauffe et assure le maintien d'une température constante. Autre avantage des pores de grande taille, ils réduisent de 11 à 14% la quantité de matériau nécessaire pour construire la termitière: de quoi bâtir plus vite une structure qui sera aussi plus légère. Autant d'idées pour inspirer les architectes humains? ■

S.B.

C. Singh et al., Science Advances, vol. 5, article eaat8520, 2019

BIOLOGIE MOLECULAIRE

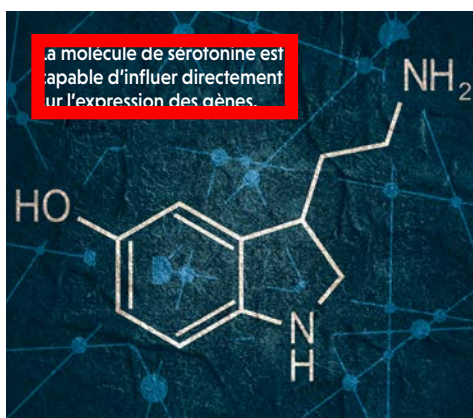
SÉROTONINE ET ÉPIGÉNÉTIQUE

Dans le noyau d'une cellule, l'ADN se trouve en général sous une forme compactée, la chromatine, où la molécule d'ADN est enroulée autour de

histones. Lorsque certains groupes chimiques (méthyl, acétyl, etc.) se fixent sur une histone, la conformation de cette dernière change et l'enroulement de l'ADN devient plus lâche (favorisant l'expression des gènes) ou plus serré (les gènes ont moins de chance d'être transcrits). On parle alors de mécanisme épigénétique: l'expression des gènes est régulée par des facteurs externes (environnementaux) et transmise d'une génération de cellules à la suivante, sans qu'une modification de la séquence d'ADN n'intervienne.

L'équipe d'Ian Maze, de l'école de médecine Mount Sinai, à New York, vient de montrer que la sérotonine, une monoamine, intervient aussi dans un mécanisme épigénétique. Cette molécule est surtout connue pour son rôle dans la régulation de l'humeur. Dans ce cas, le neurotransmetteur est émis par un neurone vers un autre où il se fixe à un récepteur en surface, ce qui module l'expression des gènes. Mais les chercheurs ont montré que la sérotonine peut aussi agir directement sur l'expression des gènes, sans passer par les

La molécule de sérotonine est capable d'influer directement sur l'expression des gènes.



récepteurs: une enzyme (TGM2) greffe des molécules de sérotonine, présentes dans le milieu cellulaire, directement sur une histone. On parle alors de sérotonylation. Les histones qui ont subi ces modifications interagiraient davantage avec le facteur de transcription TFIID, qui influe sur la chromatine pour promouvoir la transcription des gènes.

Cette découverte pose beaucoup de nouvelles questions. Par exemple, d'autres monoamines, comme l'histamine ou la dopamine, peuvent-elles aussi modifier des histones? Il est possible que ces molécules connues depuis longtemps réservent encore bien des surprises. ■

ALINE GERSTNER

J. Pareilly et al., *Nature*, vol. 567, pp. 535-539, 2019

PREHISTOIRE

UNE TRACE DE NÉANDERTAL?

Avant la dernière glaciation, le vent d'est a érigé une dune contre la face orientale du rocher de Gibraltar.

Les collègues y ont retrouvé des traces d'éléphants, de cerfs élaphe, d'auarochs, de bouquetins, de sangliers, de léopards..., bref de toutes les espèces qui hantaient la savane littorale antéglaciaire des environs de Gibraltar. Parmi elles, une trace de pied humain intrigue. Laissée par un individu qui dévala la dune il y a 28 000 ans, elle est mal conservée. Il n'est donc pas possible de mesurer s'il s'agit d'un pied néandertalien ou *sapiens*, mais l'impression générale est celle d'orteils courts et larges. Cela suggère plutôt un marcheur néandertalien, en accord avec l'absence de traces d'*Homo sapiens* anciens dans la région à l'époque, ainsi qu'avec les conclusions de Clav Finlayson.



Cette trace de pied d'un humain qui a descendu la dune du sable de Gibraltar pourrait être néandertalienne.

de l'université d'Oxford, selon qui une communauté résiduelle de Néandertaliens a vécu jusqu'il y a 28 000 ans environ à Gibraltar. Pour autant, les datations paneuropéennes suggèrent que les derniers Néandertaliens ont disparu il y a 40 000 ans. Avons-nous découvert la trace du dernier des derniers des Néandertaliens? ■

P.S.

J. Muniz et al., *Quaternary Science Review*, en ligne le 31 janvier 2019

EN BREVE

LE GRAND NUAGE DE MAGELLAN À 1,9

Cette galaxie voisine de la Voie lactée héberge de nombreuses céphéides, des étoiles variables utilisées pour estimer les distances dans l'Univers - ce sont des « chandelles standards ». Mais les incertitudes sur la distance du Grand Nuage de Magellan se répercutent sur la loi relative aux céphéides ainsi que sur l'estimation de la constante de Hubble, qui pose problème en cosmologie. Pierre Kervella, de l'observatoire de Paris, et ses collègues ont utilisé 20 systèmes d'étoiles binaires à éclipses pour mesurer la distance du Grand Nuage de Magellan. Résultat : 162 000 années-lumière, à 1 % près.

LES ORANGES-OUTANS SONT EN DANGER CRITIQUE

Les oranges-outans sont en danger critique d'extinction, à cause surtout de la déforestation. Dès lors, pour suivre leurs populations, on répertorie les nids que ces primates construisent dans la canopée. Or cela implique de surveiller de vastes zones difficiles d'accès. Claire Burke, de l'université John-Moores, à Liverpool, et ses collègues ont eu l'idée d'utiliser des drones munis de caméras infrarouges. Testée dans la forêt tropicale de Sabah, en Malaisie, la technique s'est révélée fiable.

LE MICROBIOME DE L'ISS EST RICHIE

Une équipe de l'université d'État de Washington, et ses collègues ont réalisé un catalogue des microbes et champignons présents à l'intérieur de la Station spatiale internationale (ISS). Il est important de savoir quelles espèces prolifèrent dans ce milieu, notamment en vue de missions de longue durée, sachant que les astronautes ont un système immunitaire affaibli. Les staphylocoques dorés, potentiellement dangereux, représentent 10 % des bactéries à bord.

BIOLOGIE ANIMALI

TUEUR DE GRENOUILLES

Une espèce invasive de champignon aquatique, *Batrachochytrium dendrobatidis*, serait à l'origine du déclin de

éteintes au cours des 50 dernières années. C'est ce qu'indique une vaste étude menée par Benjamin Scheele, de l'université nationale australienne, à Canberra. Le champignon provoque une maladie, la chytridiomycose, qui s'attaque à la peau des grenouilles. Les animaux ne régulent alors plus l'eau et les minéraux dans leur organisme, ce qui provoque l'arrêt du cœur.

L'hécatombe a surtout touché l'Amérique latine et l'Australie, où le champignon est arrivé à partir des années 1980. En Asie, d'où il est originaire, il semble moins affecter les populations locales d'amphibiens: elles ont probablement développé une certaine résistance. ■

S. B.

B. C. Scheele et al., *Science*, vol. 363, pp. 1459-1463, 2019

MATHÉMATIQUES

PRIX ABEL: KAREN UHLENBECK

Cette année, l'Académie norvégienne des sciences et des lettres a décerné le prix Abel à Karen Uhlenbeck, professeure

Texas à Austin, «pour ses travaux pionniers dans le domaine des équations aux dérivées partielles d'origine géométrique, de la théorie de jauge et des systèmes intégrables, et pour l'impact fondamental de ses résultats sur l'analyse, la géométrie et la physique mathématique».

Comme l'explique le président du comité Abel, Hans Munthe-Kaas, «ses théories ont révolutionné notre compréhension des surfaces minimales, comme celles formées par les bulles de savon, et des problèmes de minimisation plus généraux en dimensions supérieures.» Pour le physicien théoricien Jim Al-Khalili, «ses travaux ont conduit à certaines des avancées les plus spectaculaires en mathématiques de ces 40 dernières années.» Par ailleurs, Karen Uhlenbeck est aujourd'hui très active dans la promotion des femmes en mathématiques et pour l'égalité des sexes en sciences de façon générale. ■

S. B.

<http://www.abelprize.no>

ARCHÉOLOGIE

UNE TOMBE ÉTRUSQUE À ALÉRIA



ors de sa construction, cette tombe étrusque à hypogée consistait en un caveau souterrain (au premier plan) auquel on accédait par un couloir desservi par une volée de marches.

Sous la direction de Laurent Vidal et de Catherine Rigeade, une équipe d'archéologues de l'Inrap fouille à Aléria, en Corse, une structure funéraire souterraine étrusque. Cette tombe à chambre et à dromos (couloir), qui s'ajoute à des dizaines de tombes, achève de démontrer l'intérêt exceptionnel de la nécropole d'Aléria-Lamajone.

Situé le long d'une ancienne route reliant la cité antique à la lagune, ce cimetière étrusco-romain n'est pas le seul d'Aléria, puisque dans les

une autre nécropole, celle d'Aléria-Casabianda. Leur état de conservation avait étonné, comme fascine aujourd'hui celui des tombes d'Aléria-Lamajone. La présence de squelettes, notamment, est une aubaine, car elle va permettre l'étude d'un échantillon de population. Découvrira-t-on la présence ancienne du paludisme dans cette région marécageuse de la Corse?

Toutefois, c'est la tombe à chambre découverte sous un enchevêtrement d'autres sépultures qui passionne le plus les archéologues, puisque aucune découverte similaire n'a été faite depuis les fouilles des Jehasse. La structure funéraire est constituée d'un escalier donnant accès, au bout de six mètres de couloir, à un caveau obturé, qui semble être resté inviolé depuis l'inhumation d'une défunte, sans doute, d'après le miroir en bronze trouvé à côté du squelette.

Pour le moment, les deux mètres carrés fouillés dans le caveau ont livré une vingtaine de vases de facture étrusque, dont les vernis noirs sont parfois surpeints d'ornements ou de personnages rouges. Ainsi ces trois coupes, cet askos annulaire (l'anse est en forme d'anneau) ou encore ces quatre pichets à vin. Une vaisselle qui atteste une fois de plus du rôle central joué par le vin dans les rites sociaux étrusques, qu'il s'agisse du rite dionysiaque (un rite à mystère ayant lieu la nuit) ou des banquets aristocratiques. Ce mobilier conduit à dater la sépulture du IV^e siècle avant notre ère, mais la fouille se poursuit... ■

S. S.

<https://www.inrap.fr>, communiqué du 27 mars 2019

PALEOCLIMATOLOGIE

DE GRANDES ÈRES GLACIAIRES D'ORIGINE TECTONIQUE?

La formation de très longues chaînes de montagnes tropicales aurait conduit à des refroidissements climatiques durables.

Au cours du Phanérozoïque, c'est-à-dire les 541 derniers millions d'années, trois longues ères glaciaires ont marqué l'histoire géologique de la Terre. Étaient-elles dues à des phénomènes tectoniques? C'est ce

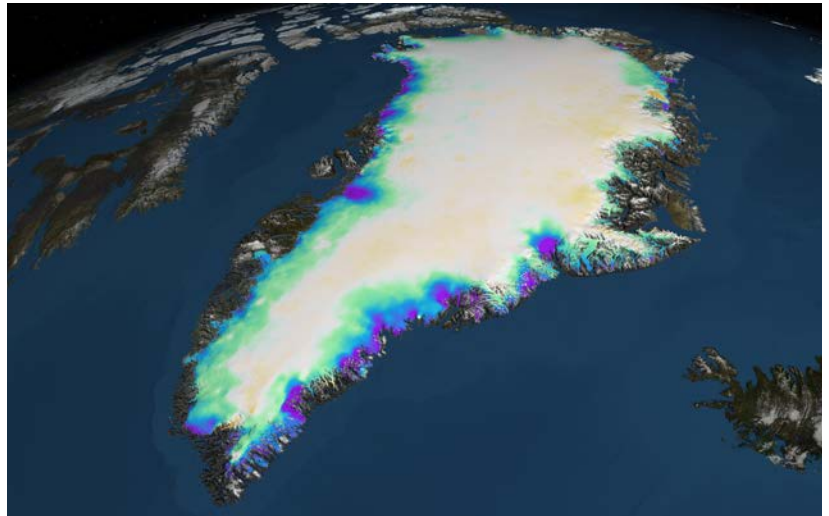
que des géologues de l'université de Californie à Santa Barbara, et ses collègues: selon eux, les montagnes formées au cours de collisions tectoniques particulières – les collisions arc-continent – auraient entraîné des refroidissements climatiques durables.

Ces longues périodes froides, pendant lesquelles au moins une partie des continents est restée couverte de calottes glaciaires, doivent être distinguées des oscillations glaciaires plus courtes dues aux variations de l'orbite terrestre, dont la dernière, par exemple, a culminé il y a 20 000 ans et pris fin il y a 11 000 ans.

La première des ères glaciaires phanérozoïques a débuté il y a quelque 455 millions d'années pour s'achever 15 millions d'années plus tard. La deuxième couvre la période allant de 335 à 280 millions d'années. La dernière ère de glaciation mondiale, qui a commencé il y a quelque 2 millions d'années, est toujours en cours, puisque l'Antarctique et le Groenland sont couverts de glace, tandis que les latitudes plus basses (Canada, Scandinavie, Patagonie...) s'englacent puis se déglacent tous les 100 000 ans environ.

Les géologues sont depuis longtemps persuadés que la présence sous les tropiques de longues chaînes de montagnes entraîne des refroidissements climatiques. Si la deuxième ère glaciaire a été marquée par l'érosion d'une longue chaîne de montagnes, la «chaîne hercynienne», la présence de nombreuses chaînes et massifs volcaniques sous les tropiques est évidente aujourd'hui: ainsi nombre des 452 volcans entourant le Pacifique (la ceinture de feu) sont sous les tropiques, tout comme les Andes et l'Himalaya.

Le mécanisme de refroidissement identifié par les géologues est le suivant: le ruissellement tropical lessive les roches silicatées qui constituent 97% de la croûte continentale montagneuse, ce qui libère des ions à propriétés alcalines, notamment les très solubles ions calcium et magnésium. Alcalinisé par leur arrivée



L'existence de terres continentales en permanence couvertes de calottes de glace (ici-dessus le Groenland) signifie que notre planète traverse une longue ère glaciaire.

40 000 KILOMÈTRES C'EST LA LONGUEUR DE LA CEINTURE DE FEU, UNE SÉRIE DE VOLCANS ET DE CHÂÎNES DE MONTAGNES EN GRANDE PARTIE SITUÉES SOUS LES TROPIQUES. EN CONTRIBUANT À L'ALCALINISATION DES OCÉANS, ELLE JOUE UN GRAND RÔLE CLIMATIQUE.

en mer, l'océan séquestre alors plus de dioxyde de carbone atmosphérique, en formant par exemple du calcaire, ce qui réduit l'effet de serre et refroidit donc durablement le climat.

Toutefois, pour Francis Macdonald et ses collègues, un phénomène tectonique particulier, les collisions arc-continent, amplifie parfois ce mécanisme. Ces collisions entre des archipels volcaniques, formés par subduction intraocéanique, et des plaques continentales créent des «sutures ophiolitiques», des massifs montagneux constitués de roches très basiques particulièrement riches en calcium et magnésium (des ophiolites), qui augmenteraient donc notablement l'alcalinisation des océans.

Pour tester cette idée, les chercheurs ont examiné les enregistrements géologiques des collisions tectoniques du passé et montré que les grandes ères glaciaires ont toutes été précédées par un pic de collisions arc-continent, lequel aurait à chaque fois formé au moins 10 000 kilomètres de sutures ophiolitiques.

Ainsi, la formation sous les tropiques de montagnes riches en calcium et magnésium et leur érosion semblent bien avoir déclenché les longues ères glaciaires, puis y avoir mis fin. ■

F.S.
F. A. Macdonald et al., Science, en ligne le 14 mars 2019.

DES CHAUVES-SOURIS
CONTRE LES FORÊTS

Des chercheurs de l'Institut Max-Planck Ornithologie de Radolfzell, en Allemagne, ont estimé le travail de reforestation accompli par les chauves-souris. Ces chauves-souris errent en effet le soir le palmier en palmier en répandant les graines des fruits consommés. Selon Mariëlle van Toor et ses collègues, une colonie de 50 000 animaux répartit quelque 300 000 graines en une seule nuit, ce qui, au bout d'un an, produit près de 800 hectares de forêt !

HOMO LUZONENSIS,
NOUVEAU HOMO

Florent Derrout du Muséum national d'Histoire naturelle, et ses collègues ont recueilli dans une grotte de l'île philippine de Luçon douze os de pied et de main et des dents manifestement humains et datant de plus de 50 000 ans. Mais leurs traits morphométriques ne correspondent pas à ceux des os et dents de toutes les espèces humaines connues, y compris *Homo sapiens* et *H. floresiensis*, eux aussi présents depuis longtemps en Asie du Sud-Est. Les chercheurs viennent donc d'introduire dans le genre *Homo* une nouvelle espèce, nommée *Homo luzonensis*.

UNE NAIN BLANCHE
AVANT UNE PLANÈTE

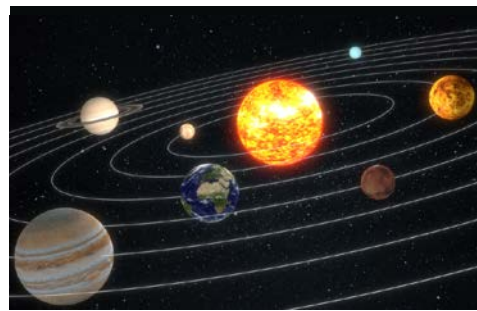
Les astronomes ont identifié à ce jour quelque 5 000 étoiles isolées d'une ou de plusieurs planètes, mais parmi elles ne figurait aucune naine blanche (type d'étoile en fin de vie). Cela vient de changer. Christopher Manser, de l'université de Warwick, au Royaume-Uni, et ses collègues ont étudié le spectre lumineux d'un disque de gaz et de débris entourant la naine blanche GDSS J122859.93+104032.9, et constaté que ses émissions varient périodiquement. Selon eux, le phénomène est dû au passage périodique d'un petit corps planétaire levant la naine blanche.

SÉDIMENTS
CONTRE CHAOS

À cause du comportement chaotique à long terme du Système solaire, il est difficile de retracer l'orbite des planètes

L'observatoire de Paris, avait en effet estimé que les erreurs propagées par la modélisation étaient multipliées par 10 tous les 10 millions d'années, ce qui réduisait à néant toute prédiction au-delà de l'environ 60 millions d'années. Paul Olsen, de l'université Columbia, et ses collègues, dont Jacques Laskar, viennent de montrer qu'en utilisant les archives sédimentaires de la Terre, il est possible d'extraire des caractéristiques anciennes de son orbite, et à terme de celles des autres planètes. De quoi repousser l'horizon de prédictibilité jusqu'à près de 200 millions d'années.

Les chercheurs ont utilisé deux carottes de sédiments du continent nord-américain à partir desquelles ils ont déduit les conditions climatiques ayant régné sur Terre il y a 200 à 225 millions d'années. Or l'orbite de la Terre détermine en partie ces conditions. Perturbée par les autres planètes, cette orbite elliptique est aussi animée de mouvements quasi périodiques : la précession du périhélie (la très lente rotation de l'axe de l'ellipse) et d'autres variations (inclinaison, excentricité). Ces cycles sont décrits par des paramètres, dits de Milanković. Mais



La mécanique céleste ne permet pas de déterminer l'évolution du Système solaire au-delà d'un horizon de 10 millions d'années. Mais la paléoclimatologie peut aider.

comment déterminer l'évolution passée de ces paramètres, étant donné la nature chaotique du système solaire ?

Grâce à l'analyse des sédiments, Paul Olsen et ses collègues ont montré en particulier qu'un paramètre, lié à la précession du périhélie de la Terre et de Mars, oscillait il y a 220 millions d'années avec une période de 1,75 million d'années, alors que la période actuelle d'oscillation est de 2,36 millions d'années.

La méthode est prometteuse, selon les chercheurs. Avec un registre géologique plus riche, expliquent-ils, il sera possible de déterminer l'orbite de toutes les planètes telluriques et de Jupiter sur une période qui s'étend au-delà de la limite des 60 millions d'années. ■

LAMBERT BARAUTE-GUINET

P. E. Olsen et al., *PNAS*, en ligne le 4 mars 2019

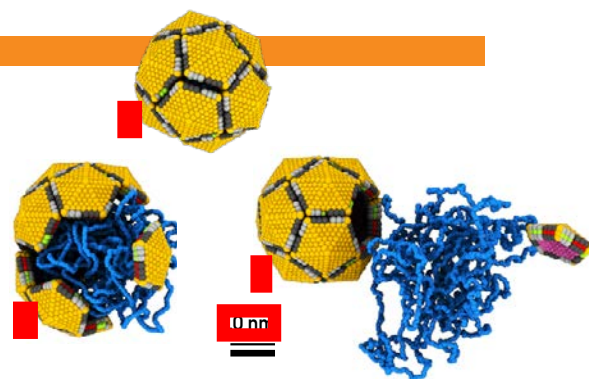
VIROLOGIE

LE DÉPLOIEMENT
DE L'ECHOVIRUS

Les virus infectent les cellules cibles en y insérant leur génome, ce qui nécessite notamment l'expulsion de leur ADN ou

ARN. Ce processus est contrôlé par une coque protéique. Ce mécanisme est encore mal compris chez de nombreux virus, notamment chez les *Enterovirus*, un groupe de pathogènes pour les humains qui inclut, par exemple, les agents de la poliomyélite (poliovirus) ou de certaines maladies rubéoliformes (echovirus).

David Buchta et ses collègues, de l'université Masaryk, à Brno, en République tchèque, ont étudié des particules virales de l'echovirus 18 et de l'echovirus 30 au cours de la libération de leur génome grâce à la cryomicroscopie électronique, technique qui permet d'obtenir des clichés avec une résolution proche de 0,1 nanomètre (10^{-10} mètre). Les images montrent



La capsid (en jaune) d'un echovirus 18 est d'abord fermée (a), puis s'ouvre (b). L'ARN (en bleu) est alors expulsé en moins d'une microseconde (c).

que trois unités constitutives de la capsid se détachent du reste de la structure. Elles forment une ouverture de 12 à 30 nanomètres de diamètre qui laisse sortir le matériel génétique. En moins d'une microseconde, la totalité du matériel génétique est expulsée du virus. ■

MARTIN TIANO

D. Buchta et al., *Nature Communications*, vol. 10, article 1138, 2019

MÉDECINE

LES POUVOIRS DE L'ESPRIT SUR LE CORPS

Patrick Clervoy

Odile Jacob, 2018

352 pages, 21,90 euros

« La force de l'esprit peut-elle changer la maladie, non seulement dans sa perception subjective, mais aussi l'amener, de façon objective, jusqu'à la guérison? »

Telle est la question au cœur de la réflexion et de la pratique médicale de ce psychiatre au Val-de-Grâce. Il nous interpelle à travers de nombreux exemples où la narration de situations troublantes remet en cause une vision purement rationnelle et exclusive de la souffrance physique et mentale et de sa prise en charge thérapeutique. De l'hystérie de Charcot au vitalisme de Lasègue, de l'efficacité du placebo aux miracles de Lourdes en passant par la méthode Coué et aux prophéties autoréalisatrices, l'auteur nous rappelle que de nombreuses approches ont tenté de répondre à cette énigme... et que chacun de nous peut un jour être confronté à ce que Galilée décrivait comme « quelque chose de bien réel dans le champ de l'impossible ».

Certes, les connaissances

scientifiques (sur le fonctionnement des synapses cérébrales, le rôle du système nerveux sympathique, la plasticité du cerveau, etc.) et les moyens d'étude les plus récents en neurophysiologie permettent d'expliquer partiellement ces étranges chemins de la guérison. Pour autant, cet abord physiopathogénique est incapable de répondre rationnellement à la réalité troublante de cette force psychique capable de conditionner et devenir physique. Sans dénigrer l'efficacité de la médecine moderne, l'auteur nous invite ainsi à considérer que la guérison est profondément liée à la « pensée positive », où l'imaginaire, la foi et une espérance raisonnée jouent un rôle déterminant vers le mieux-être. Car la guérison est avant tout une réconciliation entre soi et son état de santé.

BERNARD SCHMITT
CERNH. LORIENT

ART ET SCIENCES

LEONARD DE VINCI ANATOMISTE

Martin Clayton et Ron Philo

Actes Sud, 2019

156 pages, 29 euros

Il faudra attendre la fin du XVIII^e siècle pour que l'on s'intéresse

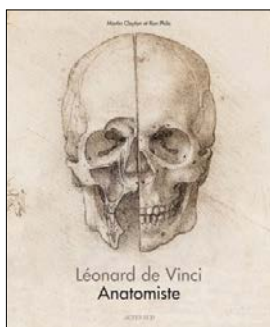
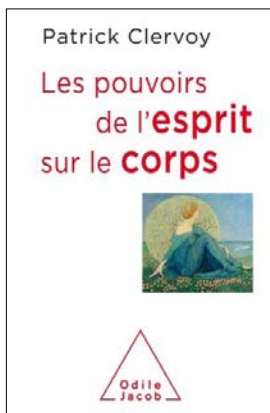
à l'anatomie de Léonard de Vinci. Or s'il avait été publié du vivant de Léonard (1452-1519), ce traité aurait révolutionné l'anatomie bien avant Vésale (1514-1564) et son œuvre majeure *La Fabrique du corps humain*! Chez Léonard, le regard du scientifique est toujours intimement lié à celui de l'artiste: beauté plastique et exactitude anatomique ne font qu'un dans ses dessins, où l'observation du modèle vivant s'allie à la connaissance apportée par la pratique de la dissection. Et lorsqu'il ne dispose pas de matériel humain, les animaux prennent le relais et il réalise ses célèbres « fantaisies anatomiques ». Il ne faut alors pas s'étonner de voir le squelette de l'homme se mêler, par exemple, à celui du cheval, car, du vivant de Léonard, on considérait les anatomies des mammifères comme presque équivalentes entre elles. Son art qui permet une stylisation incomparable, qui apporte la clarté nécessaire à ces illustrations didactiques, ainsi que des mises en page inventives démultipliant les angles de vue.

Quant à l'expression des émotions

ses dessins préparatoires de *La Cène* renvoient à la façon dont Léonard a abordé cette question dans son travail d'anatomiste. Ainsi, dans une des premières ébauches consacrées à son traité, Léonard écrit qu'il commencera par analyser les corps de l'homme et de la femme; ensuite, les membres du corps et son développement selon les âges; puis les veines, les nerfs, les muscles et les os, pour enfin conclure avec les quatre mouvements de l'âme, universels selon l'artiste: la joie, la douleur, la colère et la férocité.

Magnifique par la qualité des images qui reproduisent les dessins anatomiques et les célèbres notes en écriture spéculaire caractéristique de Léonard, cet ouvrage s'impose aussi par la clarté et la précision de ses textes.

MARIE-JOËL BUGE
ÉCOLE GEORGES MÉLIÈS, ORLÉANS



TECHNOLOGIE

NOMADE DES MERS

Corentin de Chatelperron

Arte Editions, 2018

140 pages, 29,90 euros

Cet ouvrage tient du journal de bord intelligent d'un MacGyver responsable de nombreuses missions à la frontière de la science et de la technologie. L'auteur, l'ingénieur français Corentin de Chatelperron, a parcouru les océans sur un catamaran, en quête des plus utiles *low techs*. Il définit ces basses technologies comme des systèmes simples, peu coûteux, accessibles et durables. Son épopée maritime l'emporte vers onze pays, où chacune de ses escales lui permet de découvrir et de présenter un système. L'auteur ne se limite à aucun domaine pour observer tous azimuts les inventions humaines. Cela va du biodiesel des Seychelles au dessalinisateur d'Afrique, en passant par le pédalier multifonction de Saint-Lô.

Par exemple, il se préoccupe des mers de déchets plastiques, révélées récemment, en écoutant les solutions des Brésiliens de Rio de Janeiro. Parmi leurs différentes actions, on notera une très simple et pourtant ingénieuse découpe-bouteille pour fabriquer du fil plastique. À l'autre bout du globe, l'île de Phuket dévoile au navigateur une nourriture originale. La Thaïlande est en effet le premier producteur d'insectes d'élevage du monde, perspective séduisante pour l'alimentation du futur. Outre un goût souvent délicieux, il faut savoir que les insectes sont les animaux les plus riches en protéines, à élevage très économique et non polluant.

Pas besoin donc d'être un bricoleur de génie pour mettre en pratique les « trucs » proposés dans ce livre : il suffit juste de faire preuve de volonté écologique pour améliorer notre bon usage de la planète où nous vivons.

STEPHEN ROSTAIN

INRS, LABORATOIRE ARCHÉOLOGIE DES AMÉRIQUES

PHYSIQUE

À LA RECHERCHE DES NEUTRINOS

Antoine Kouchner et Stéphane Lavignac

Dunod, 2018

140 pages, 22 euros

« Oserais-je dire que les physiciens expérimentateurs n'ont pas l'ingéniosité suffisante pour fabriquer les neutrinos? », aurait dit le célèbre astrophysicien Arthur Eddington dans les années 1930, au beau milieu d'une controverse portant sur l'existence même de cette particule élémentaire. Malgré cette défiance, les physiciens ont persisté dans leurs expériences, en arrivant à détecter puis à produire les neutrinos. Deux spécialistes de ce domaine expérimental ont le mérite de consacrer un bel essai aux étonnantes découvertes liées au neutrino.

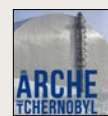
L'idée même de cette particule naît en effet de l'imagination fertile du physicien autrichien Wolfgang Pauli, qui la propose comme « solution désespérée » pour résoudre une question épineuse qui hantait les physiciens il y a un siècle. Il conçoit ainsi l'existence d'une particule qui, produite dans certains processus radioactifs, est presque indétectable. Depuis, les expérimentateurs ont déployé des trésors d'imagination pour détecter et étudier les neutrinos. Dans cet ouvrage, les auteurs nous montrent les multiples facettes de cette particule, produite copieusement dans le Soleil, dans des explosions d'étoiles ainsi que par les rayons cosmiques.

Le livre suit cette histoire passionnante jalonnée de découvertes qui ont été récompensées par trois prix Nobel. On apprend ainsi comment fonctionnent les détecteurs de neutrinos, tels *Super-Kamiokande*, au Japon, ou *IceCube*, au pôle Sud. Les auteurs décrivent avec clarté et précision les expériences et leurs résultats et ne rechignent pas à entrer dans certains détails quelque peu techniques. Le lecteur curieux pourra ainsi partager pendant un moment la route de ces particules, inlassables voyageurs et messagers de l'infiniment petit et de l'infiniment grand.

MARCO ZITO

NEA-IRFU, GIE-SUR-YVETTES

ET AUSSÉ



UNE ARCHE POUR TCHERNOBYL

Patrick Coupechoux (dir.)

Recherche Midi, 2019

80 pages, 28 euros

Novarka, la « Nouvelle Arche », en ukrainien, est le dispositif de confinement du réacteur accidenté de Tchernobyl. Ce livre couvre tous les aspects scientifiques, techniques et humains de sa construction. Cette superbe structure faisant trois fois le poids de la tour Eiffel a été construite par une équipe mêlant des nationalités, avec une importante contribution française. Ce livre magnifique montre pourquoi cette œuvre technique et architecturale majeure, conçue pour confiner son atmosphère intérieure en toutes circonstances pendant cent ans, constitue la base indispensable du démantèlement de la dangereuse ruine nucléaire de Tchernobyl.

LA GUERRE DES FOURMIS

Franck Courchamp et Mathieu Ughetti

Les Équateurs, 2019

100 pages, 15 euros

Présentes sur Terre depuis plus de 100 millions d'années, les fourmis dépassent les humains en biomasse. Afin de détailler les nombreux faits fascinants les concernant, les auteurs de cette petite bande dessinée mettent plaisamment en scène deux amies, dont une se moque du sujet de recherche de son amie entomologiste : les fourmis. Vous suivons alors le cours d'une après-midi amicale, durant laquelle les défenses de l'une face à la moquerie de l'autre nous permettent d'apprendre beaucoup sur qui domine vraiment la Terre.

LES HOMMES DE LA LUNE

Alain Cirou et Jean-Philippe Balasse

Seuil, 2019

124 pages, 24,90 euros

L'objectif de ce beau livre est de nous replonger dans les années 1960 et les missions Apollo en regardant des photographies des « hommes de la Lune » et de ce qui les entourait. Outre les astronautes Neil Armstrong, Mike Collins et Buzz Aldrin ainsi que les acteurs importants du programme Apollo, les hommes de la Lune sont aussi des personnages aujourd'hui connus, qui étaient à l'époque des enfants et des jeunes, et qui se souviennent avec émotion du 21 juillet 1969.

PARIS

DU 12 MARS AU 7 JUILLET 2013

Musée du quai Branly
www.quaibranly.fr

Océanie

Comme pour célébrer les 250 ans écoulés depuis le premier voyage (en 1768) de l'explorateur James Cook, cette grande

anciennes ou contemporaines, issues de cet immense territoire qu'est le Pacifique insulaire. Avec ses 25000 îles que des populations originaires d'Asie ont commencé à coloniser il y a 40000 ans, ce territoire présente une très grande diversité culturelle et linguistique.

Mais il se caractérise aussi par quelques traits communs, qui sont ici mis en exergue au fil des œuvres présentées.

Il en est ainsi, par exemple, de l'art de la navigation et du milieu marin ou aquatique, dont les peuples océaniques tirent une bonne partie de leurs ressources et de leur imaginaire.

Le visiteur pourra ainsi admirer des pirogues ou des ornements de pirogues, des statuettes, des coiffes, des boucliers et autres objets de valeur, ainsi que des œuvres d'artistes contemporains – des pièces souvent très belles qui témoignent de l'histoire des peuples d'Océanie, de leurs croyances, des échanges qu'ils ont eus avec les Européens et des défis auxquels ils sont confrontés aujourd'hui.



PARIS

JUSQU'AU 18 AOÛT 2013

Aquarium tropical du Palais de la Porte dorée
www.aquarium-tropical.fr

Aqua, l'eau de haut en bas



Des satellites pour surveiller l'état des océans et des eaux continentales, et aider à gérer les ressources en eau; l'eau dans la nature, son rôle dans le vivant et dans les sociétés humaines; le circuit de l'eau potable à Paris: tels sont les grands thèmes de cette exposition «trois en une», consacrée à une ressource précieuse et fragile.

LIEGE (BELGIQUE)

JUSQU'AU 2 JUIN 2013

Maison de la Science
www.maisondelascience.ulg.ac.be

Bla bla bla: un monde de communication



Munis d'une tablette iPad, les visiteurs se familiarisent avec l'univers de la communication, celui de la nature comme celui de la technologie. Une plongée dans les moyens de communication utilisés par le monde vivant – des microorganismes aux animaux ou aux plantes –, les humains et leurs machines.

ET AUSS

Jeudi 2 mai, 18 h
Campus Joseph-Aiguier, Marseille

provence-corse.cnrs.fr
LE DEMI-DEGRÉ QUI CHANGE TOUT

Un réchauffement global de 1,5 °C n'a pas du tout les mêmes conséquences qu'une hausse de 2 °C. Le climatologue Joël Guiot explique pourquoi.

Lundi 13 mai, 14 h
Palais universitaire, Strasbourg

www.sciences.unistra.fr
ERIDU LA SUMÉRIENNE

Anne-Caroline Rendu-Loisel parle de la cité du dieu Enki, dans le sud de l'Iraq, où les fouilles ont repris.

Mardi 14 mai, 20 h 30
Les Champs Libres, Rennes
www.espace-sciences.org

L'HÉMOGLOBINE DE L'ARÉNICOLE

Franck Zal, biologiste et fondateur de la société Hemarina, explique l'intérêt médical d'une molécule transporteuse d'oxygène extraite d'un petit ver de sable.

Jeudi 16 mai, 12 h 30
Université Paul-Sabatier, Toulouse
www.univ-tlse3.fr

AGRICULTURE URBAINE

Camille Dumat, de l'INP-Ensai et du Certop, parle des atouts de l'agriculture urbaine, mais pointe aussi ses limites.

Du 23 au 26 mai
Place Saint-Sulpice, Paris
www.cijm.org/salon

CULTURE ET JEUX MATHÉMATIQUES

Comme les précédents, le 20^e salon Culture & jeux mathématiques propose animations, conférences, forum des métiers des maths, jeux, tournois...

Mardi 28 mai, 17 h
Acad. des sciences, Paris
www.academie-sciences.fr

PLANÈTES EXTRASOLAIRES

L'astrophysicienne Anne-Marie Lagrange raconte ses recherches sur les exoplanètes, répond aux questions du public.

AGGLOMERATION CREIL-SUD-OISE

DU 27 AVRIL AU 15 JUIN 2019
Lieux divers à Creil et ses environs
www.creilsudoise.fr/usimages

Uimages



Cette biennale de la photographie industrielle, qui en est à sa troisième édition, permet de voir douze expositions gratuites se tenant dans diverses communes de l'Agglomération Creil-Sud-Oise. Elles présentent des travaux de divers photographes internationaux, réalisés entre les années 1940 et aujourd'hui, qui constituent autant de regards sur le monde de l'entreprise, son histoire, sa sociologie, l'impact des nouvelles technologies... Par exemple, le photographe polonais Mariusz Forecki capte l'évolution des entreprises de son pays vers le libéralisme, tandis que le Slovène Matjaž Krivic raconte la route du lithium, composant principal des batteries qui équipent les véhicules électriques ou les robots. ■

PIRONT

DU 14 AU 18 MAI 2019
Saint-Médard-en-Jalles
www.saint-medard-en-jalles.fr



La Lune, l'aventure continue

Cinquantième de la mission *Apollo 11* oblige.

Cette nouvelle édition du festival de l'air et de l'espace, Big Bang, est dévolue à notre satellite naturel et à son exploration, passée comme future. Au programme : des expositions, des animations, des spectacles vivants, des conférences et tables rondes avec des scientifiques, des astronautes ou des témoins des missions *Apollo*, un salon de l'emploi en aéronautique... « 69, année lunatique » sera bien célébrée ! ■

SORTIES DE TERRAIN

Dimanche 5 mai, 9 h
Fournes-Cabardès (Aude)
Tél. 04 68 49 12 12
www.lpo.fr

CHANTEURS DE LA MONTAGNE NOIRE

Journée matinée de randonnée dans la Montagne noire à l'écoute des chants aviens et printaniers.

Jeudi 16 mai, 14 h 30
Chaillac (Indre)
Tél. 02 54 28 12 13

parc-naturel-brenne.fr

CHAILLAC, LA COMMUNE DES CAILLOUX

Journée excursion géologique pour voir des échantillons de minerais et comprendre comment s'est créée la vallée de l'Anglin.

Samedi 18 mai, 10 h
Montereau-Fault-Yonne (77)
Tél. 01 64 22 61 17

www.anvl.fr

À LA DÉCOUVERTE DES ORCHIDÉES

Journée sortie à la journée pour admirer et mieux connaître ces remarquables fleurs.

Dimanche 19 mai
Saint-Martin-de-Crau (13)
Tél. 04 42 20 03 83

www.cen-paca.org

INVENTAIRE DU COUSSOUL D'ASE

Le coussoul d'Ase, dans la Crau, est un site naturel de 64 hectares aux milieux variés. Cette journée est proposée pour participer à l'inventaire de sa faune et de sa flore.

Samedi 25 mai, 9 h
La Coutronne, Auriol
Var et Bouches-du-Rhône
Tél. 04 42 20 03 83

www.cen-paca.org

VALLOIN DU CROS ET PLAN DES VACHES

Randonnée à la journée à la découverte de la faune et de la flore d'un haut valloin de la Sainte-Baume et de pelouses sommitales.

Vendredi 31 mai, 10 h
Lingé (Indre)
Tél. 02 54 28 12 13

parc-naturel-brenne.fr

PAPILLONS DE BRENNÉ

L'animation, dont la tenue dépend de la météo, vise à observer des espèces particulières de papillons.

PARIS

DU 16 AVRIL AU 21 JUILLET 2019
BnF François-Mitterrand
www.bnf.fr

Le monde en sphères

Ceux qui soutiennent que la Terre est plate jugeront probablement que cette exposition participe d'une vaste campagne de

minoritaire et ultrapuissant. Les autres ne boudront pas leur plaisir en venant admirer près de 200 œuvres tirées des collections de la BnF et d'autres prestigieux établissements comme le musée du Louvre ou celui des Arts et métiers.

Globes, sphères armillaires, gravures, manuscrits enluminés, affiches, œuvres d'art moderne et autres splendides documents accompagnent le visiteur pour lui raconter cette



histoire de science et d'humanité qui débute au 7^e siècle avant notre ère et va jusqu'à aujourd'hui. Autrement dit, de l'époque où s'est imposé le modèle d'un globe terrestre au centre d'un univers formé de sphères concentriques, portant les étoiles et les planètes, jusqu'aux photographies de la Terre prises depuis l'espace, en passant par l'astronomie islamique, la révolution copernicienne et les lois de Newton. ■



LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK

VERS LE HARDWARE MOU?

Mous et résistants aux chocs, fondés sur l'ADN carboné, les ordinateurs du futur auront une architecture inspirée par la nature.



Un téléphone portable flexible serait plus résistant aux chocs

Les téléphones pliables et enroulables, qui commencent à être expérimentés – ou, du moins, annoncés – par les fabricants, nous rappellent qu'une différence essentielle entre les téléphones, les ordi-

est que les premiers sont durs, quand les seconds sont mous. Cette dureté est la cause de leur fragilité: ces machines n'encaissent pas les chocs et cassent, contrairement au roseau. Avec ces téléphones, nous assistons à une tentative, sans doute encore inachevée, d'imiter l'une des caractéristiques du vivant: sa mollesse.

D'autres caractéristiques physicochimiques distinguent les ordinateurs des êtres vivants. Les premiers sont secs, quand les seconds sont surtout constitués d'eau. Ce solvant sert de véhicule à l'autres molécules, contribue aux réactions chimiques, parfois à la régulation thermique des organismes, etc. Son rôle est à tel point essentiel que, pour savoir si la vie est possible sur une autre planète, nous commençons souvent par v

chercher de l'eau liquide. Par ailleurs, dans leur ouvrage *L'Invention de la mémoire* (2017), Michel Laguës, Denis Beaudoin et Georges Chapouthier rappellent que l'élément chimique caractéristique des organismes vivants est le carbone, alors que celui des ordinateurs est un autre élément tétravalent, mais plus lourd: le silicium.

Notre vision actuelle des ordinateurs est peut-être transitoire

Pour concevoir des machines, imiter le vivant n'est pas toujours une bonne idée. Quand nous construisons, par exemple, des avions ou des sous-marins, nous ne cherchons plus à imiter les oiseaux ou les poissons. En particulier, nous n'essavons pas de les rendre aussi

nous. De même, quand nous programmons un ordinateur pour qu'il trie des données ou joue aux échecs, imiter la façon dont procèdent les humains n'est pas la meilleure méthode.

Cette idée mérite cependant peut-être parfois d'être explorée. À terme, des ordinateurs, des tablettes ou des téléphones mous seraient peut-être moins susceptibles de se casser ou de se rayer que des appareils durs. De même, ils seraient peut-être plus résistants à l'eau s'ils étaient eux-mêmes constitués d'eau, alors qu'il vaut mieux, aujourd'hui, éviter de laisser tomber son téléphone dans une piscine. Enfin, utiliser des atomes de carbone plutôt que des atomes de silicium est peut-être aussi une bonne idée: en 1994, Leonard Adleman a utilisé un «ordinateur» formé de quelques gouttes d'une solution d'ADN dans un tube à essai pour résoudre un problème mathématique, trouver un chemin passant une fois exactement par chacun des sept nœuds d'un graphe. Même si les réactions biochimiques sont beaucoup plus lentes que la commutation d'un transistor de silicium, cette lenteur sera peut-être un jour compensée par le parallélisme massif que permettent ces ordinateurs à ADN.

Des ordinateurs plus proches des organismes vivants seraient sans doute plus ergonomiques que ceux d'aujourd'hui. Il serait, par exemple, peut-être plus agréable, pour une personne sourde, d'avoir un implant cochléaire mou, formé d'eau et de molécules carbonées et sans alimentation électrique, qu'un implant dur, sec et formé de transistors en silicium et d'une batterie.

Même si ces téléphones mous et ordinateurs à ADN restent aujourd'hui marginaux, imaginer de telles machines organiques nous permet de prendre conscience que notre vision actuelle des ordinateurs, des tablettes et des téléphones comme des parallélépipèdes, durs, secs, en silicium et alimentés électriquement est peut-être transitoire. ■

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

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

OFFRE D'ABONNEMENT

DURÉE
LIBRE

3 FORMULES À CHOISIR

FORMULE DÉCOUVERTE	FORMULE PAPIER + HORS SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
☒	☒	☒
☒	☒	☒
☒	☒	☒
☒	☒	☒
☒	☒	☒
☒	☒	☒
4.90€ PAR MOIS	6.50€ PAR MOIS	8.20€ PAR MOIS
29 %	31 %	43 %

- Le magazine papier (12 numéros par an)
- Le hors-série papier (4 numéros par an)
- L'accès en ligne illimité à pouirlascience.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

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Pour la Science - Service abonnements - 19 rue de l'Industrie - BP 20095 - 97402 Mirikira Cedex - email : pouirlascience@abopress.fr

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

2/6195111

☐ **Je choisis ma formule** (merci de cocher) et je complète l'autorisation de prélèvement ci-dessous

☐ FORMULE DÉCOUVERTE 12 n° du magazine papier 4.90€ PAR MOIS -29 % DPV4E90	☐ FORMULE PAPIER + HORS SÉRIE 12 n° du magazine papier 4 Hors-série papier 6.50€ PAR MOIS -31 % BPV6E50	☐ FORMULE INTÉGRALE 12 n° du magazine papier 4 Hors-série papier Accès illimité aux contenus en ligne 8.20€ PAR MOIS -43 % IPV8E20
--	--	--

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

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
 70 bis bd du Montparnasse - 75014 Paris

réduction 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 1/12/2019 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site <https://boutique.pouirlascience.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 et 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 (UE) 2016/679 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@pouirlascience.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

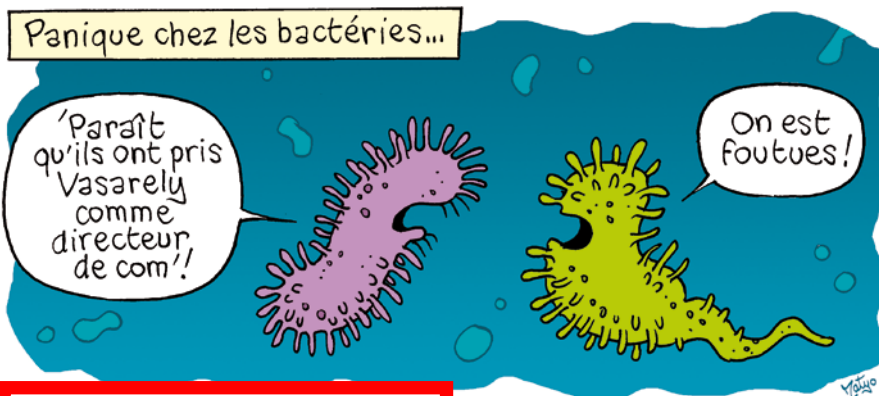
4 / MÉRITES JOINDRE OBLIGATOIREMENT EN RIB



LA CHRONIQUE DE
VIRGINIE TOURNAY

VASARELY ET L'ANTIBIORÉSISTANCE

Le langage simple et universel de l'art de Victor Vasarely a facilement conquis le monde. Une démarche qui pourrait inspirer les messages sur la résistance aux antibiotiques.



La grande rétrospective du centre Pompidou, à Paris, consacrée à Victor Vasarely (jusqu'au 6 mai) révèle à travers son titre, *Le Partage des formes*, un artiste caractérisé par la popularisation planétaire de son

optique», Vasarely a conquis notre quotidien: journaux, vêtements, fresques murales, jusqu'au logo de Renault.

L'appropriation massive et rapide de cette culture visuelle surprend. La géométrie abstraite de ses œuvres, informées des sciences modernes, fait surgir un volume ou un mouvement dans le regard par un jeu précis d'illusion optique. Aussi, le succès populaire de l'intuition créatrice de l'artiste est lié à son application des différentes géométries, de la mécanique ondulatoire et de la pensée cybernétique.

Ce succès invite ceux qui ambitionnent de connecter davantage le monde de la science avec la société à s'interroger. Comment une telle familiarité sociale s'est-elle structurée autour de ces formes imprégnées de mathématiques? Quels

enseignements tirer de cette popularisation en matière de communication scientifique? Dans une société où l'attention des publics devient très difficile à capter durablement, ne pourrait-on concevoir des messages de prévention pour la santé ou la sécurité routière inspirés de cette éducation populaire par les sens?

Souvenons-nous de l'efficacité sociale du slogan: «Les antibiotiques, c'est pas automatique!»

Alors qu'en février dernier, six académies savantes ont alerté conjointement sur l'antibiorésistance, un sondage de l'Ifop publié fin 2017 révélait que un Français sur deux ne connaît pas bien cette notion ni n'a conscience qu'il s'agit d'un problème de santé publique grave et mondial. Pourtant, l'acquisition d'une

résistance aux antibiotiques par des bactéries est un phénomène contrôlable, car il résulte de la surconsommation de ces médicaments. Il suffit de gestes simples appliqués collectivement pour freiner l'apparition de bactéries multirésistantes. Ne pas considérer les messages d'alerte, tel celui émis par le ministère des Solidarités et de la Santé (<https://bit.ly/2QlsWos>), nous condamnerait irrémédiablement à un monde privé d'antibiotiques.

Que nous enseigne l'attraction sociale du style de Vasarely sur la réception de l'information scientifique? Dans ses œuvres, les motifs élémentaires associés à des gradations de couleurs composent une sorte de grammaire optique universelle. Ce vocabulaire visuel ne supposant aucune connaissance préalable, l'industrie du divertissement se l'est facilement approprié. Et les œuvres détiennent une tonalité dynamique, car leur appréciation est indissociable du mouvement du regard. Les formes perçues n'étant jamais stabilisées, le public ne peut rester passif face aux illusions d'optique: l'«esperanto visuel» de Vasarely fait du spectateur un observateur actif, capable de lier sa lecture de l'espace à celle du mouvement.

L'engagement des publics dans un univers marqué par un alphabet universel des formes est donc la clé du succès de la réception des œuvres de Vasarely. Si la formation à la démarche scientifique est une nécessité absolue, elle doit s'articuler à une éducation par les sens et à la nécessité civique d'engager le plus grand nombre dans les messages de prévention. Souvenons-nous de l'efficacité sociale du slogan: «Les antibiotiques, c'est pas automatique!» Simple, universel et mélodique, il suscitait une vigilance collective évidente face à la menace de l'antibiorésistance.

L'art optique est parvenu à redéfinir la fonction de l'artiste dans la société en plaçant pour un art accessible à tous. La médiation scientifique saura-t-elle replacer le savant en bienfaiteur de l'humanité comme le fut jadis Louis Pasteur?

VIRGINIE TOURNAY, biologiste de formation, est politologue et directrice de recherche au CNRS au Cevinof, à Sciences Po, à Paris.



AcademiaNet offre un service unique aux instituts de recherche, aux journalistes et aux organisateurs de conférences qui recherchent des femmes d'exception dont l'expérience et les capacités de management complètent les compétences et la culture scientifique.

AcademiaNet, base de données regroupant toutes les femmes scientifiques d'exception, offre:

- Le profil de plus des 2.300 femmes scientifiques les plus qualifiées dans chaque discipline – et distinguées par des organisations de scientifiques
- ou des associations d'industriels renommées
- Des moteurs de recherche adaptés à des requêtes par discipline ou par domaine d'expertise
- Des reportages réguliers sur le thème »Women in Science«

Partenaires

Robert Bosch **Stiftung**

Spektrum
der Wissenschaft

nature

SCIENCE
POUR LA



L'ESSENTIEL

► Aujourd'hui, avec l'avènement du séquençage massif du génome, nombre d'entreprises dans le monde proposent à tout un chacun de déterminer ses origines ou son risque de développer telle ou telle maladie.

► Toutefois, si lire la séquence d'un génome humain

son interprétation reste très complexe.

► Elle dépend notamment des bases de données auxquelles on compare le génome et des parties du génome que l'on examine.

► Ces bases de données privées sont par ailleurs une mine d'or

LES AUTEURS



CATHERINE BOURGAIN
génétiennne
à l'Inserm et
directrice du



AUDREY SABBAGE
génétiennne
des populations
à l'université
de Paris



MAURO TURRIN
sociologue à
l'université
de Nantes

Maladies, paternité, origines ethniques Faut-il se fier aux tests génétiques?

Crachez dans le tube et renvoyez le kit au laboratoire, nous vous révélerons ce que votre ADN dit de vous. Ainsi vantés par les entreprises qui les vendent, les tests génétiques paraissent simples et fiables. Pourtant...

En 2010, sans hésiter, Joe Pickrell, un jeune généticien américain, accepte de rendre publiques les données d'analyse de son génome que la société 23andMe vient de produire. Il sait en effet que ses don-

nées ne révèlent rien de surprenant. Aucun risque particulier de développer une maladie grave n'est signalé. L'analyse génétique confirme qu'il a bien les yeux bleus et que ses ancêtres viennent du nord de l'Europe. Toutefois, dans les heures qui suivent cette publication, un autre généticien, Dienekes Pontikos, analyse à nouveau ces données avec un logiciel qu'il vient de mettre au point pour reconstruire les origines des personnes. Il conclut alors que si 80% des ancêtres de Joe Pickrell viennent bien du nord de l'Europe, 20% sont juifs ashkénazes. Extrêmement surpris de ce résultat, ce dernier essai pendant des journées

entières de comprendre pourquoi le logiciel de Dienekes Pontikos se trompe. Mais une discussion avec des membres de sa famille lui apprend que c'est lui qui fait erreur. Un de ses arrière-grands-parents, arrivé aux États-Unis au début du xx^e siècle, était un juif ashkénaze.

Cette histoire, que Joe Pickrell a racontée en direct sur un site de discussion en ligne, annonçait une longue série d'expériences vécues par des utilisateurs de tests génétiques en accès libre sur Internet, qu'il s'agisse de la recherche d'un père biologique ou de la découverte fortuite d'une fausse paternité, ou encore d'un échange de bébés à la naissance. De fait, en quelques années, le marché de ce type de tests génétiques a explosé et s'est transformé en phénomène de société.

En 2018, la Société internationale de généalogie génétique (Isogg) a recensé trente-neuf entreprises dans le monde qui fournissent des tests

génétiques d'ancestralité directement aux consommateurs. Si la grande majorité d'entre elles sont localisées sur le territoire nord-américain, un nombre croissant d'entreprises fleurissent en Europe et au Moyen-Orient (Autriche, Royaume-Uni, Espagne, Italie, Suisse, Russie, Israël, Liban, Émirats arabes unis), et certaines commencent à s'implanter en Asie (Chine, Inde) et en Amérique du Sud (Brésil).

La vente de ces tests a commencé à décoller en 2013 et connaît une croissance exponentielle depuis 2016. En avril 2018, plus de 15 millions de personnes avaient déjà envoyé leurs échantillons d'ADN pour analyse, soit 15 fois plus qu'en 2013, selon la généalogiste américaine Leah Larkin, auteure du blog The DNA Geek, qui a rassemblé les données de cinq entreprises phares du secteur, AncestryDNA, 23andMe, MyHeritage, GEDmatch et FamilyTreeDNA. Stimulé par une publicité omniprésente, l'engouement semble ne pas faiblir. Si la vente de ces tests poursuit sa croissance exponentielle, 100 millions de personnes pourraient avoir fait appel d'ici à 2021, voire plus avec la prolifération des spots publicitaires et la diminution des coûts de séquençage de l'ADN.

UN MARCHÉ LUCRATIF

L'offre résonne particulièrement aux États-Unis, jeune nation transformée par des vagues de migrations successives, où nombre de citoyens ne connaissent pas bien leur histoire familiale. Les Afro-Américains en quête de leurs lointaines racines africaines sont les premiers à recourir à leurs services. Pour Henry Louis Gates, historien à l'université Harvard, ces analyses génétiques permettent aux Afro-Américains de renverser symboliquement les stigmates de l'esclavage et de la traite transatlantique en renouant avec leur patrimoine africain. Une démarche popularisée par de nombreuses stars afro-américaines et la série télévisée *Finding Your Roots*, diffusée sur la chaîne publique PBS depuis 2012, qui a conduit le téléspectateur à la recherche des racines de célébrités. Ce sont ainsi les héritages génétiques de l'animatrice Oprah Winfrey, de l'actrice Whoopi Goldberg, du cinéaste Spike Lee, du producteur de musique Quincy Jones ou encore des époux Obama qui ont été révélés au grand public.

Un fructueux business pour les entreprises proposant les tests, qui n'hésitent pas à se diversifier dans le tourisme, comme en témoigne ce partenariat entre AncestryDNA et l'agence de voyage EF Go Ahead Tours pour la conception de voyages sur mesure dans les «pays d'origine» en fonction des résultats des tests ADN. Ou ce grand jeu-concours que le comparateur de voyages Momondo a organisé avec AncestryDNA et qui offre un voyage dans le pays «de ses racines» au participant qui aura envoyé la

meilleure vidéo le montrant en train de découvrir ses résultats de test ADN. Plus surprenant encore, ce récent partenariat établi avec Spotify, l'une des plateformes de streaming les plus utilisées du monde, qui propose de générer des playlists personnalisées en fonction des résultats des tests ADN de la société AncestryDNA, sous le slogan accrocheur «Découvrez votre ADN musical».

En France, cette génomique dite récréative est interdite. Avoir recours à ces tests en libre accès sur Internet est passible de 3750 euros d'amende. Notre pays semble pourtant ne pas échapper totalement à cet engouement pour la généalogie génétique. «Chaque année, 100 000 Français contournent la loi en achetant ces tests aux États-Unis, en Grande-Bretagne ou en Suisse», souligne le journaliste et généalogiste Guillaume de Morant dans une pétition qu'il a lancée en 2017 pour réclamer la légalisation des tests ADN généalogiques en France. Bien qu'AncestryDNA et 23andMe, les deux leaders mondiaux du secteur, n'envoient pas leurs kits en France, les sites internet de généalogie génétique regorgent d'astuces pour contourner cet embargo de livraison. Il est possible par exemple d'acheter le kit AncestryDNA auprès d'un revendeur sur le site amazon.com qui propose une livraison en France... pour un prix du kit 40 dollars plus cher que le tarif usuel.

Toutefois, avec ce succès grandissant s'élèvent aussi nombre d'interrogations et d'inquiétudes. Par quelle magie moderne ces tests nous révèlent-ils des informations si précieuses sur nos proches et lointains ancêtres? L'analyse des informations contenues dans notre ADN permet-elle réellement d'inférer de façon précise et fiable nos origines ethniques et géographiques? Existe-t-il vraiment un marqueur génétique de l'ethnie? L'ADN peut-il être utilisé pour définir notre identité? Bref, dans quelle mesure peut-on faire confiance aux tests génétiques en accès libre?

Les premières mises en garde sont apparues à la fin des années 2000. Les tests génétiques en

100 000 Français par an contournent la loi en achetant ces tests à l'étranger

CES VARIATIONS QUI NOUS DISTINGUENT

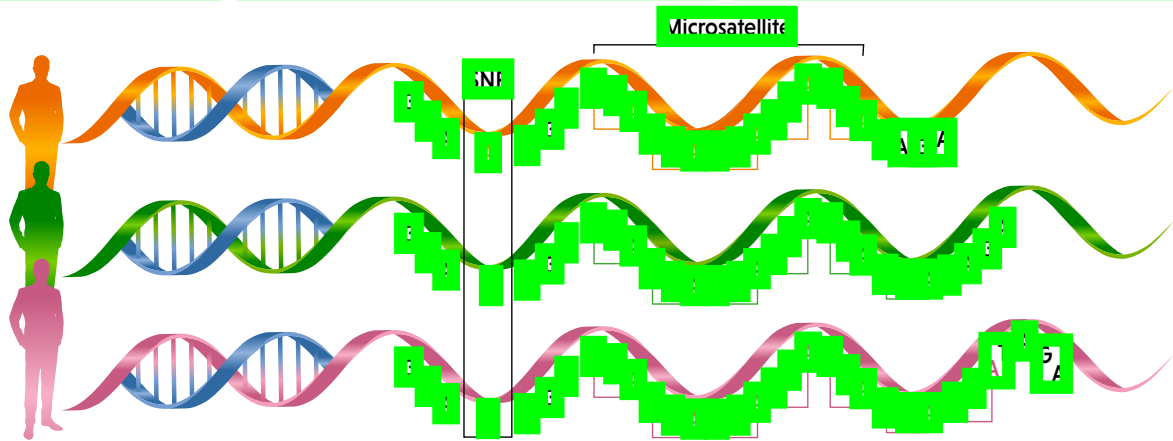
D'un individu à l'autre, le génome varie en des endroits très ciblés, comme les SNP (variations d'un seul nucléotide) ou les microsatellites (répétitions d'un motif court).

Les tests génétiques reposent sur l'étude de la variation génétique entre individus, ou polymorphisme. Ce terme traduit le fait que tous les individus d'une même espèce ne sont pas identiques génétiquement : à certains endroits du génome, ils présentent différentes versions d'une même séquence, nommées allèles. Les endroits variables sont nombreux, mais très ciblés : un génome humain compte plusieurs millions d'endroits variables, mais deux génomes humains tirés au hasard ne diffèrent qu'au niveau de 0,1 % de leur séquence d'ADN.

La forme la plus commune de variation de séquence entre deux individus est le polymorphisme touchant un seul nucléotide : les nucléotides sont les constituants de l'ADN) ou SNP (pour *single-nucleotide polymorphism*). Si quatre états alléliques sont théoriquement possibles à une position donnée (l'ADN n'est constitué que de quatre nucléotides distincts, notés A, T, G, C et assemblés en une longue

chaîne), seuls deux allèles sont observés pour la grande majorité des SNP. Les SNP sont stables, abondants et distribués uniformément dans tout le génome. L'une des méthodes les plus performantes actuellement pour mettre en évidence un polymorphisme SNP est l'usage des puces à ADN : sur une lame, on fixe des centaines de milliers de fragments d'ADN complémentaires des régions à SNP et l'on regarde à quelles versions de ces fragments l'ADN testé se lie.

Un autre marqueur moléculaire très utilisé est le microsatellite. Il est constitué d'une répétition continue d'un motif court (de 1 à 4 nucléotides le plus souvent). Le nombre variable de répétitions du motif détermine les différents allèles du marqueur. Moins abondant dans le génome que le SNP, le microsatellite présente cependant l'avantage d'être plus informatif du fait de son multi-allélisme : un même marqueur peut avoir plusieurs dizaines d'allèles.



accès libre sur Internet avaient vu le jour quelques années plus tôt, en 2002, aux États-Unis. Dans ce xxi^e siècle débutant, les technologies disponibles ne permettaient pas encore d'analyser l'ADN complet d'une personne à des coûts raisonnables. Le séquençage du premier génome humain venait d'être publié et son coût total était estimé à 3,8 milliards d'euros. Il était néanmoins possible de caractériser des endroits précis du génome, connus pour être très variables d'une personne à l'autre : soit des régions ponctuelles nommées SNP, soit des régions plus étendues, nommées microsatellites (voir l'encadré ci-dessus).

Chacun de ces « marqueurs génétiques » existe en plusieurs versions nommées allèles, et tout individu présente deux allèles pour chaque marqueur : un reçu de la mère et l'autre du père. Or, pour tester la paternité, il suffit de comparer chez deux personnes (un enfant et un père potentiel) une dizaine de marqueurs microsatellites répartis de façon aléatoire sur le génome. Si, pour tous les marqueurs comparés, l'enfant présente un allèle également retrouvé chez le père potentiel, la paternité est

extrêmement probable. De la même façon, quelques marqueurs situés sur le chromosome Y ou l'ADN mitochondrial – des portions un peu particulières du génome – permettent de proposer des indications d'origine pour certains ancêtres (voir l'encadré page 31). Enfin, en considérant des marqueurs dans un gène bien choisi, il est possible de calculer un risque de développer une maladie, comme le diabète. Ces pratiques restaient toutefois relativement marginales et peu médiatisées. Mais en 2007, l'entrée sur le marché d'entreprises analysant l'ADN de façon beaucoup plus systématique a changé la donne.

VOTRE TEST CHEZ VOUS POUR UNE POIGNÉE DE DOLLARS

« Genetics just got personal » : avec ce slogan, la société 23andMe s'est alors mise à vendre, pour 1 000 dollars, un service fondé sur la caractérisation de plusieurs milliers de SNP répartis sur tout l'ADN. Les deux autres sociétés qui s'étaient lancées à la même époque n'étaient pas en reste. Quand l'islandaise DecodeMe affirmait : « C'est mon code », l'américaine Navigenics

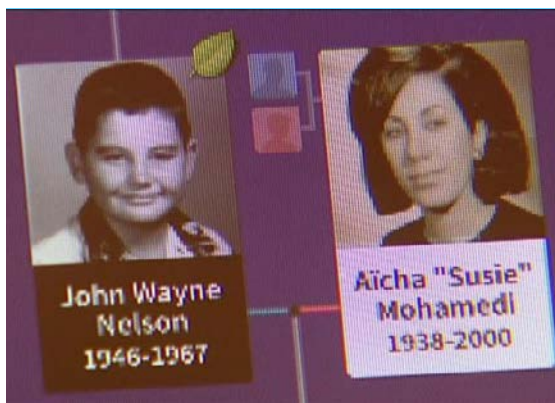
DES TESTS DE PATERNITÉ FIABLES

Afin de répondre à la demande croissante de tests de paternité, plus de la moitié des entreprises vendant des tests génétiques d'origine proposent également des kits spécifiques permettant d'établir génétiquement un lien de filiation entre un enfant et son père présumé à partir d'échantillons buccaux. Ces tests génétiques de paternité requièrent au moins la participation d'un enfant et du père présumé et donnent des résultats d'autant plus fiables que le nombre de marqueurs génétiques étudiés est grand (entre 15 et 21 marqueurs microsatellites pour les kits standards). Les laboratoires accrédités respectant les normes internationales de test fournissent une probabilité allant jusqu'à 99,999 % dans le cas d'un résultat positif (paternité confirmée) et 0 % dans le cas contraire (paternité exclue).

En France, où le recours à un test de paternité n'est autorisé que dans

le cadre d'une procédure judiciaire, les résultats de tels tests d'initiative personnelle ne sont pas exploitables officiellement et ne peuvent être considérés comme preuve légitime devant un tribunal. L'utilisateur risque le plus d'être poursuivi et cité devant le tribunal correctionnel, où il encourt jusqu'à un an de prison et 15 000 euros d'amende. Cela ne décourage pas pour autant les amateurs : on estime à plus de 20 000 le nombre de tests génétiques de paternité réalisés chaque année par des ressortissants français auprès de laboratoires étrangers en dehors de tout cadre légal, alors que la justice française n'ordonne chaque année que 6 000 expertises génétiques pour la recherche ou la contestation de paternité. Ces tests de filiation se déclinent aussi en tests de maternité, de fraternité ou de grand-parentalité. On utilise d'ailleurs ces derniers pour déterminer la paternité en l'absence du père naturel de l'enfant.

En 2016, Nordine Mohamedi, né sous X 10 ans plus tôt puis reconnu par sa mère Aïcha, pensait qu'il ne retrouverait jamais son père, un soldat américain nommé John Wayne Nelson, quand ses proches lui ont offert un test ADN à Londres, chez AncestryDNA. La base de données l'a relié à une jeune Texane, dont l'oncle se nommait John Wayne Nelson.



plaidait pour «Mes gènes, ma santé, ma vie, mon guide». Ces masses de données génétiques étaient ensuite transformées en informations personnalisées portant sur la santé – risques d'être atteint d'une quinzaine de maladies (diabète, cancer du sein ou de la prostate, obésité, arthrite rhumatoïde...) – ou sur les origines.

Les sociétés 23andMe et DecodeMe ont aussi proposé aux utilisateurs de comparer leurs marqueurs génétiques avec ceux d'autres utilisateurs du service, de façon à détecter d'éventuels parents biologiques plus ou moins éloignés. En effet, si quelques marqueurs bien choisis suffisaient pour identifier un lien parent-enfant, la nouvelle quantité d'information génétique disponible permettait désormais de détecter des cousins au deuxième, voire parfois au troisième degré. Pour faire parler d'elle, la société 23andMe a même proposé à des célébrités de se soumettre au test.

et a offert la possibilité d'obtenir le pourcentage d'ADN que l'on partage avec elles.

Cette attention médiatique nouvelle tenait aussi aux nombreuses fées qui se sont alors penchées sur le berceau de ces entreprises pionnières. On y trouve de nouveaux investisseurs comme Google, mais aussi des fonds de capital-risque comme Kleiner Perkins, spécialisés de longue date dans le soutien aux biotechnologies et aux technologies de l'information. On y trouve également des personnalités scientifiques de premier plan qui acceptent d'entrer dans les conseils scientifiques des sociétés ou qui affichent publiquement leur soutien. Ainsi, au sommet économique mondial de Davos en 2007, Francis Collins, alors directeur des Instituts américains de la santé et ancien leader du projet *Génome humain*, est-il venu en personne encourager les deux fondatrices de 23andMe, Anne Wojcicki et Linda Avey. Lesquelles proposaient alors aux décideurs économiques de «cracher dans le tube», c'est-à-dire de se soumettre à cette première étape emblématique qui permet ensuite d'extraire l'ADN contenu dans les cellules de la salive et de l'analyser.

C'est à cette époque que des contestations ont commencé à s'élever, émanant notamment de médecins, de généticiens et de responsables des agences chargées de la régulation des dispositifs de santé. Les principales inquiétudes concernaient le volet santé de ces tests. Pour bien comprendre ces critiques, il est nécessaire de se pencher sur la démarche qui permet de proposer à un individu, à partir de son information génétique, un risque de développer une maladie.

DES INQUIETUDES DANS LE MILIEU MÉDICAL

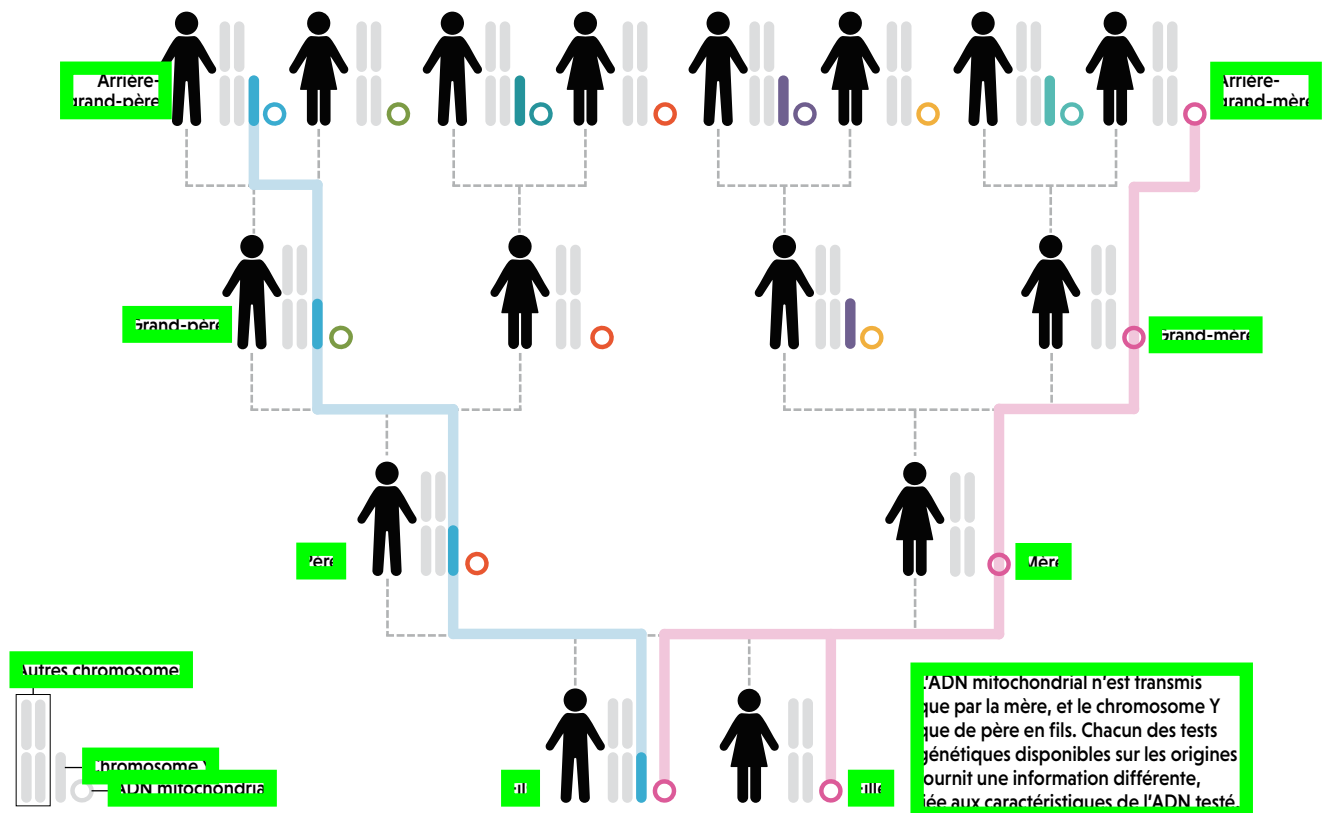
Depuis le début des années 2000, les chercheurs qui s'intéressent aux mécanismes biologiques conduisant certaines personnes à développer une maladie complexe, comme le diabète ou l'infarctus du myocarde, utilisent une nouvelle approche nommée GWAS (pour *genome wide association study*, ou «étude d'association sur le génome entier»). Il s'agit en pratique de constituer de grands échantillons de patients atteints de la même maladie et d'aussi grands échantillons d'individus sains. Dans les deux groupes, tous les individus sont soumis à une analyse de leur ADN. Plusieurs milliers de marqueurs génétiques SNP sont ainsi caractérisés sur un gros échantillon de patients et un gros échantillon de témoins.

L'approche consiste alors à calculer, pour chacun de ces marqueurs, la proportion de patients qui présentent un des allèles possibles (on parle de fréquence de l'allèle), à calculer cette même proportion pour les témoins, et enfin à comparer ces deux proportions. Plus ces deux proportions sont différentes et plus

LE PRINCIPE DES TESTS GÉNÉTIQUES

l'histoire commence toujours de la même manière : un échantillon de salive prélevé soit en tamponnant l'intérieur de sa joue, soit en crachant dans un tube, à renvoyer au laboratoire après réception du kit de prélèvement. Puis l'entreprise explore environ 700 000 variations génétiques (SNP) de notre génome par une technique

de génotypage à haut débit utilisant des puces à ADN, moins précise que le séquençage complet, mais moins chère et plus facile à utiliser. Certaines variations fournissent des informations spécifiques sur la prédisposition à diverses maladies ou sur une multitude de caractéristiques physiologiques (couleur des cheveux, tolérance à la caféine, sensibilité au goût amer...) – informations révélées aux consommateurs qui ont souscrit aux options « santé » ou « traits » proposées par certaines sociétés. La majorité des autres variations sont utilisées à des fins de généalogie génétique. Trois principaux types de tests d'origine sont disponibles, chacun apportant une information différente.



LE TEST AUTOSOMAL

Très majoritaire, il consiste à analyser les variations génétiques situées sur les 22 paires de chromosomes non sexuels présents dans le noyau de nos cellules et transmis par nos parents. L'analyse d'un sous-ensemble de variations judicieusement sélectionnées, incluant notamment des marqueurs nommés AIM (ancestry informative markers), permet d'inférer l'origine biogéographique d'un individu, c'est-à-dire de fournir une estimation de ses régions d'origine. Ces AIM sont des SNP qui se caractérisent par de fortes variations de fréquence entre populations appartenant à différents groupes géographiques ou ethniques et ont par conséquent un fort pouvoir discriminant pour différencier ces groupes. Avec ce test, on est ainsi capable de remonter jusqu'à la huitième génération, soit environ 200 ans. On l'utilise aussi pour rechercher des cousins génétiques dans les bases de données ou estimer le pourcentage d'ADN provenant de l'homme de Néandertal.

LE TEST DE L'ADN MITOCHONDRIAL

Il se focalise sur les variations du génome mitochondrial, dont la transmission se fait quasi exclusivement par la mère. Distinct du génome contenu dans le noyau, ce petit segment circulaire d'ADN se situe dans les mitochondries, petits organites présents dans le cytoplasme de nos cellules. Cet ADN se transmet inchangé de mère en fille, excepté de rares mutations que l'on utilise pour définir des groupes d'individus portant les mêmes mutations. Le test permet ainsi de déterminer le groupe d'origine de la lignée maternelle. Certaines entreprises proposent des tests plus spécifiques en procédant à un séquençage des régions hypervariables de l'ADN mitochondrial, particulièrement informatives, ou à un séquençage complet de la molécule. Si ce test permet de remonter 20 à 100 générations (500 à 2 500 ans), il ne donne accès qu'à un seul ancêtre maternel sur le million d'ancêtres possibles d'un individu 20 générations plus tôt (en l'absence de consanguinité).

LE TEST DU CHROMOSOME Y

Il n'est accessible qu'aux hommes puisque seuls ces derniers ont un chromosome Y. Contrairement aux chromosomes non sexuels, la majorité (95 %) de l'ADN de ce chromosome ne subit pas de recombinaison (pas d'échange avec le chromosome homologue) lors de la formation des spermatozoïdes, aussi les mutations apparaissant sur cette molécule sont-elles transmises de père en fils. Quelques centaines de mutations ponctuelles du chromosome Y sont utilisées pour définir des groupes de mutations associés à différentes lignées masculines. Le test permet d'identifier le groupe d'origine de la lignée paternelle d'un individu, mais ne donne accès qu'à un seul de ses ancêtres (le père du père du père, etc.). Une femme peut demander à un membre masculin de sa famille de se faire tester (frère ou père) pour obtenir ces résultats.

LE NOUVEAU MARCHÉ DES DONNÉES GÉNÉTIQUES

Une clé du succès des entreprises commercialisant des tests génétiques est sans doute leur capacité à convaincre leurs clients d'intégrer leurs données personnelles sensibles dans de grandes bases de données susceptibles d'intéresser la recherche biomédicale tant publique que privée. Le cas de la société

23andMe est emblématique à cet égard. En 2013, lorsque la FDA, l'administration américaine des denrées alimentaires et des médicaments, interdit la vente de tests génétiques de santé en accès libre, deux des trois entreprises qui s'étaient lancées sur ce marché en 2007, Navigenics et DECODEme, ont déjà fermé boutique. La seule qui ait tenu, 23andMe, s'est imposée en ouvrant largement ses services et en favorisant des usages multiples.

Promouvant une culture fondée sur l'autonomie individuelle, la connectivité permanente et la démocratisation de la science et de la médecine, la compagnie californienne a parié très tôt sur l'affinité entre génétique et informatique. Sa communication revendiquait pour chacun le droit d'accéder à son information génétique et mettait en avant la capacité de la société à rendre cette information intelligible à tous.

Parallèlement, l'entreprise a intégré les pratiques du numérique en favorisant la circulation et le partage des données. Depuis son compte personnel, l'utilisateur peut comparer son ADN avec celui d'autres usagers, être mis en contact avec des centaines de « parents génétiques » potentiels, discuter de ses résultats sur des forums ou encore télécharger ses données brutes (les versions – ou allèles – des centaines de milliers de marqueurs analysés dans son génome) pour les téléverser sur d'autres sites afin de les analyser de nouveau.

Enfin, la société propose à chaque usager de contribuer « en personne » au progrès de la recherche biomédicale en mettant ses données génétiques à disposition et même en les enrichissant avec des informations sur sa santé ou son style de vie. Avec plus de 80 % d'usagers ayant autorisé l'utilisation de leurs données génétiques à des fins de recherche, 23andMe dispose d'une des plus grandes bases génétiques du monde. L'ADN de ses clients apparaît ainsi comme son véritable joyau. Depuis 2015, il a permis à l'entreprise de se faire une place dans la recherche internationale en publiant des études fondées sur sa base de données. Il a également attiré des sociétés pharmaceutiques.

Depuis quelques années, en effet, la possibilité de mettre un nouveau médicament sur le marché est de plus en plus souvent conditionnée à l'identification d'un sous-groupe de patients chez lesquels il est jugé plus efficace. La plupart du temps, cette étape passe par l'identification d'un profil génétique de « bons répondeurs ». Les données génétiques deviennent dès lors un sésame pour cette industrie. En 2018, GlaxoSmithKline a annoncé avoir négocié 300 millions de dollars une licence exclusive d'accès aux données de la société 23andMe, révélant à cette occasion que sa base contiendrait le profil de 5 millions d'usagers.

À côté de ces investissements massifs, comme dans d'autres secteurs du numérique, le domaine a vu fleurir des initiatives à but non lucratif, épousant la philosophie du logiciel libre. Des utilisateurs de services génétiques payants ont développé des sites web tels que openSNP, SNPedia ou Open Humans sur lesquels ils partagent gratuitement leurs données personnelles, tandis que d'autres ont développé des structures coopératives comme Midata, qui permettent aux usagers de garder le contrôle sur leurs propres données et les conditions d'accès. Ces initiatives sont cependant encore loin de faire le poids face aux bases de données des entreprises privées.

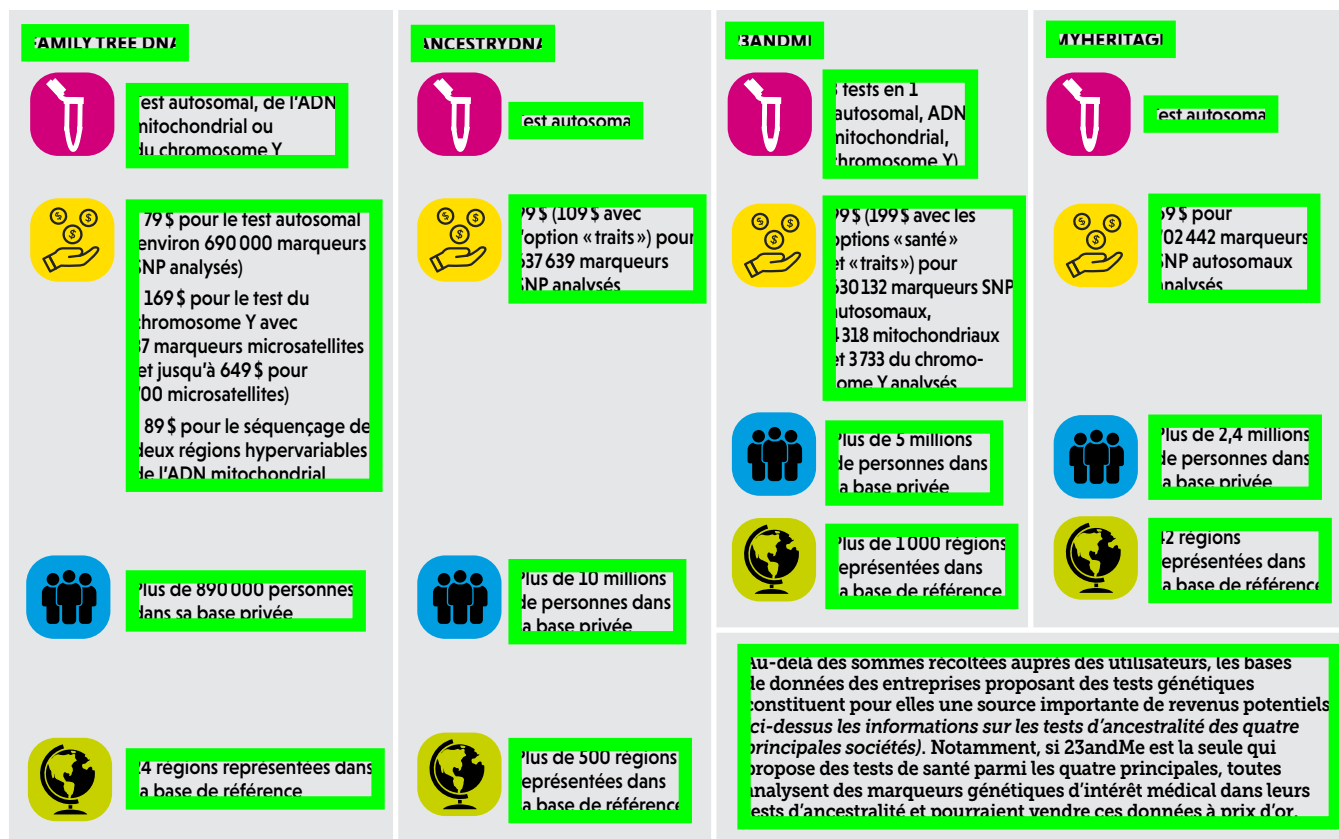
Le marqueur considéré distingue l'échantillon des patients et celui des témoins. Ce résultat, lorsqu'il est confirmé dans d'autres échantillons, peut être utilisé de façon inversée pour évaluer le risque qu'une personne encore non atteinte développe la maladie au cours de sa vie : plus la personne présente les allèles associés au groupe de malades dans les études GWAS et plus son risque de maladie est élevé. *A contrario*, plus elle présente d'allèles retrouvés plus fréquemment chez les témoins, et moins son risque de maladie est élevé.

C'est précisément cette dernière étape, essentielle pour le modèle des tests génétiques de santé vendus directement au consommateur, qui a fait l'objet de critiques émanant d'une partie de la communauté scientifique. Ainsi, dans un avis publié en 2010 sous le titre *Quelle valeur accorder aux prédictions de risques pour les maladies multifactorielles?*, la Société française de génétique humaine insistait-elle sur un élément fondamental et pourtant souvent éludé. Dans la plupart des cas, les causes des maladies complexes restent inconnues. Il est toutefois clair que si des facteurs génétiques interviennent, des facteurs du milieu, auxquels sont ou non exposées les personnes, interviennent également et parfois de façon décisive. La Société évoquait ainsi le cas d'une personne qui serait porteuse de tous les

facteurs de risques génétiques associés au diabète de type 2, pour remarquer que si cette personne était mince et sans antécédents familiaux, son risque d'être atteinte diminuait considérablement.

Or les méthodes statistiques utilisées pour passer des résultats d'études GWAS aux risques individuels de maladie reposent au contraire sur une hypothèse très simplificatrice. Elles supposent en effet que les maladies complexes sont causées par des facteurs génétiques, nombreux, mais sans interaction avec des facteurs du milieu. Les risques proposés ne tiennent donc compte que du patrimoine génétique des individus. Les Américains parlent ainsi de *genomic health risks* («risques génomiques de

Le risque réel de maladie dépend aussi des conditions de vie



santé»). Dans la très grande majorité des cas, les risques calculés de cette façon ne sont que de très mauvaises approximations du risque réel pour un individu donné, qui dépend également de son mode de vie et de l'environnement dans lequel il vit et travaille.

DES RESULTATS LIVRES SANS CADRE MÉDICAL

La Société française de génétique humaine condamnait ainsi « ces mesures de risque individuel, considérant que c'est une façon de diffuser une perception erronée des risques » dont les conséquences sont de deux types. À l'échelle individuelle, cette perception est susceptible de causer des angoisses ou des réassurances inappropriées. À l'échelle collective, sa diffusion est de nature à multiplier des examens et actes médicaux préventifs dont l'efficacité est très limitée au regard des coûts associés pour les systèmes de protection sociale.

De nombreuses voix critiquaient ainsi le principe même de livrer ces mesures de risque génomique de maladie directement aux consommateurs, sans l'entremise d'un professionnel de santé. L'enjeu pointé était précisément celui de l'interprétation des résultats, la capacité à tenir compte des limites scientifiques de ces informations et à faire le lien avec des options raisonnables de prise en charge clinique.

En novembre 2013, la FDA, l'agence américaine qui régit le marché des produits alimentaires, des médicaments et des dispositifs médicaux, porta un coup d'arrêt à la diffusion directe au consommateur de ces tests génétiques pour la santé. Elle reprochait à la société 23andMe de vendre des tests sans avoir démontré leur qualité technique ni leur capacité à offrir aux patients une information suffisamment valide pour prendre de bonnes décisions concernant leur santé, sans accompagnement médical. L'agence évoquait notamment les tests génétiques pour prédire la réponse à un traitement anticoagulant alors très largement diffusé, la warfarine. Faute d'avoir démontré la qualité et l'efficacité de ces tests, la société ferait courir aux utilisateurs le risque de modifier à tort leur traitement, une modification qui pouvait se révéler létale. L'agence imposa à 23andMe l'arrêt immédiat de ses services pour la santé.

Des limites sont par ailleurs assez vite apparues concernant les tests génétiques destinés à la recherche des origines, mais elles n'ont conduit à aucune critique ou interdiction par la FDA. En effet, contrairement aux tests pour la santé, les services génétiques portant sur les origines n'entrent pas dans le périmètre d'action de l'agence américaine. Les méthodes utilisées sont de plus assez différentes. Si...

omme pour les tests génétiques de santé, ce n'est pas l'ADN entier qui est analysé, mais des centaines de milliers de marqueurs SNP, les allèles identifiés chez l'individu testé sont cette fois comparés à la fréquence de ces mêmes allèles dans plusieurs populations vivant dans différentes régions du monde (voir l'encadré page 37).

L'EXPLOSION DU MARCHÉ DES TESTS SUR LES ORIGINES

Pour constituer une telle base de référence, les laboratoires de généalogie génétique utilisent les données publiques des grands projets de recherche internationaux explorant la diversité génétique de notre espèce tels que le projet HGP (Human Genome Diversity Project), comptant 1000 individus issus de 51 populations, le projet Hapmap (1200 personnes de 11 populations) ou le projet 1000 Génomes (2500 individus de 26 populations). En plus de ces panels publics, les laboratoires enrichissent leur base de référence avec les données génétiques collectées directement auprès de leurs clients (80% des utilisateurs de 23andMe autorisent le partage de leurs données, selon l'entreprise) ou auprès des clients des laboratoires concurrents. En témoigne le grand projet de collecte *One Family One World*, lancé en 2017 par la société britannique LivingDNA, qui encourage toute personne ayant déjà réalisé un test génétique à télécharger ses données brutes sur sa plateforme afin de constituer le plus large panel possible d'origines mondiales.

Enfin, certains laboratoires vont chercher directement sur place les échantillons d'ADN d'intérêt pour répondre à leurs problématiques spécifiques. C'est le cas de la société AfricanAncestry, spécialisée dans les origines africaines des Afro-Américains, qui dispose, dans sa base privée, de données sur plus de 200 populations ou ethnies vivant actuellement en Afrique. Certains laboratoires offrent d'ailleurs des kits gratuits aux individus dont les quatre grands-parents sont nés dans des régions sous-représentées dans leur base.

Ici se situe la première limite des analyses proposées : la précision et la fiabilité des résultats obtenus dépendent largement de la qualité et de la taille de la base de référence. Or, loin d'être exhaustives, ces bases ne contiennent qu'un nombre limité d'échantillons de personnes contemporaines, regroupées de façon arbitraire en ensembles géographiques ou ethniques sous le nom de « populations ». De fait, le sens exact de ces « populations » varie d'un laboratoire à l'autre selon les critères utilisés pour les définir (nationalité, langue, territoire, religion, histoire). En 2008 déjà, la Société américaine de génétique humaine considérait que même les meilleures bases de données actuelles



ne représentaient qu'un échantillonnage médiocre de la diversité génétique humaine mondiale.

Aujourd'hui, les bases ont certes grossi, mais restent très insuffisantes. Ainsi, une jeune femme née au Vietnam et adoptée à l'âge de un mois qui souhaiterait connaître les ethnies dont elle pourrait être issue ne trouverait pas la réponse satisfaisante à ses interrogations, le panel le plus complet à l'heure actuelle ne distinguant qu'une seule origine pour le Vietnam sur la cinquantaine d'ethnies recensées dans ce pays. S'il paraît possible d'attribuer le génome d'une personne à un continent particulier avec une bonne probabilité statistique, tout résultat plus précis, comme la localisation dans un pays ou dans une ville, doit être considéré avec prudence.

Ce manque de fiabilité transparait dans les divergences de résultats obtenus pour un même ADN envoyé à différents laboratoires, comme en témoigne cet utilisateur anonyme le 22 janvier 2019, dans un commentaire sur le site *genealogie-genetique.fr* : « Force est de constater que l'interprétation de l'ADN n'est pas au point pour déterminer des origines par pays. Les divergences entre laboratoires sont sans appel. Pour l'instant la seule convergence des trois laboratoires est que je suis Européen à 100% et pas du tout Français ».

En plus de différer d'un laboratoire à l'autre, les résultats des tests sont susceptibles d'évoluer avec le temps au fur et à mesure de

es vrais jumeaux ont des génomes très semblables... mais leur analyse par test génétique d'ancestralité peut se révéler surprenante. En 2018, les jumelles monozygotes canadiennes Charlise et Carly Agro ont indépendamment effectué des tests de cinq entreprises de généalogie génétique (AncestryDNA, MyHeritage, 23andMe, FamilyTreeDNA et LivingDNA). Malgré 99,6% des SNP étudiés retrouvés identiques chez les jumelles (confirmant, s'il était besoin, le fait qu'elles sont issues du même œuf), ces entreprises ont obtenu de curieuses différences ethniques. Par exemple, selon 23andMe, Charlise a 2,6% d'origines franco-allemandes, absentes chez Carly. Les résultats variaient aussi d'une entreprise à l'autre.



l'ajout d'échantillons d'ADN dans les bases de données de référence. C'est avec ce message qu'AncestryDNA a informé ses clients en septembre 2018 d'une importante mise à jour de sa base: «Votre ADN ne change pas, mais nous avons maintenant 13000 échantillons de référence supplémentaires et une nouvelle science puissante pour vous donner de meilleurs résultats d'appartenance ethnique.» De quoi perturber un néophyte en test ADN qui peut ne pas comprendre pourquoi certaines origines apparaissent ou disparaissent de son rapport ethnique, même si la plupart des utilisateurs semblent accueillir favorablement cette plus grande précision dans leurs résultats. «Je savais que j'avais une ascendance irlandaise, je me demandais pourquoi elle n'apparaissait pas dans le rapport précédent», commente Katy Jean, une Canadienne qui a vu l'analyse ethnique de son ADN évoluer avec la base de données d'AncestryDNA, dans un article soulignant cette évolution sur le site de la CBC, le service de radiodiffusion canadien.

Un autre facteur pouvant expliquer les divergences de résultats entre laboratoires vient des différences dans les portions de génome examinées pour inférer l'origine biogéographique d'un individu: chaque entreprise utilise son propre panel privé de variations génétiques spécifiques, incluant notamment des marqueurs nommés AIM (*ancestry informative markers*). Les probabilités d'attribution d'origines, tout comme leur précision, dépendent de la quantité et de l'informativité des marqueurs sélectionnés. Ces informations restent inaccessibles aux chercheurs du milieu académique, rendant impossible toute validation scientifique des conclusions fournies par ces tests. Faute de contrôles suffisants pour assurer la qualité des informations vendues, les témoignages faisant état de résultats aberrants fleurissent sur internet, comme celui de ces vraies jumelles canadiennes qui ont reçu des compositions ethniques différentes après envoi de leur ADN à la même entreprise, malgré une similarité à 99,6%

les données ADN brutes utilisées pour les générer (voir ci-contre). Ou celui de ces parents dont les enfants ont un pourcentage d'une origine ethnique supérieur à la somme des leurs, comme Nade, qui rapportait le 19 janvier 2019 sur le site genealogie-genetique.fr qu'elle et son mari avaient respectivement 7,6% et 0% d'origine irlandaise/écossaise/galloise, alors que leur fille en avait 26,5%.

DES TESTS D'ANCESTRALITÉ... SUR POPULATIONS ACTUELLES

Enfin, l'utilisation de populations contemporaines, et non ancestrales, pour la comparaison avec les ADN individuels testés ne fait qu'ajouter à la complexité d'interprétation des résultats. Ces tests abusivement appelés l'«origine» ou d'«ancestralité» ne nous révèlent pas d'où vient notre ADN dans le passé, mais dans quelle mesure il ressemble aux ADN présents aujourd'hui sur la planète. Avec l'évolution rapide des frontières et les migrations massives de populations de ces derniers siècles, il est difficile de connaître les localisations passées des populations actuelles, et encore moins d'inférer ce qu'étaient autrefois leurs stocks génétiques.

Les résultats, imprécis et partiels, ne sont donc à considérer qu'à titre indicatif et doivent être confrontés aux données issues de recherches généalogiques classiques. «Le généalogiste génétique n'a plus qu'à se replonger dans les livres d'histoire pour retrouver les connexions entre ancêtres, origines géographiques de l'époque et liens génétiques possibles avec les populations», conclut Nathalie Ivanovic-Floricoourt, passionnée de généalogie génétique depuis dix ans, sur le site genealogie-genetique.fr (dont elle est l'auteure, de même que du livre à succès *L'ADN, un outil généalogique*, en rupture de stock deux semaines après sa parution en mars 2018).

Par ailleurs, si l'achat d'un test génétique d'origine peut apparaître au premier abord comme une distraction innocente sans conséquence grave pour le consommateur, il expose ces personnes à une multitude de risques peu apparents. Au-delà du simple gaspillage d'argent du fait de l'imprécision ou de l'inexactitude des résultats obtenus, ces tests constituent parfois une menace sérieuse pour la vie privée des consommateurs, souvent insuffisamment préparés à ce qui peut bouleverser leur identité et leur histoire personnelle. Certaines entreprises offrent en effet un service facultatif proposant à ses utilisateurs de rechercher, dans leur base privée de données, d'autres usagers qui leur sont génétiquement similaires, et de préciser pour chacun leur degré de parenté. Si cette recherche constitue une aubaine pour les personnes adoptées, nées sous X ou conçues à partir de dons de sperme,

J'ai une ascendance irlandaise, je me demandais pourquoi elle n'apparaissait pas

Katy Jean, utilisatrice d'un test d'ancestralité

et peut leur permettre de retrouver leurs parents biologiques, il arrive qu'elle conduise à des révélations inattendues quand le test est réalisé «en famille». Un individu peut ainsi découvrir que son frère n'est qu'un demi-frère (avec parfois en bonus pour le père la révélation de l'infidélité de son épouse), ou que sa sœur beaucoup plus âgée est en fait sa mère.

En mars 2017, une étude de Nathalie Moray, de l'université catholique de Louvain, et ses collègues révélait que peu d'entreprises parmi les 13 étudiées mettaient en garde le consommateur de la possibilité de découvrir involontairement une «paternité mal attribuée», malgré les conséquences pour les mineurs et les adultes impliqués dans les tests. La Toile regorge d'histoires d'infidélité et d'autres secrets de famille révélés au grand jour à la suite de l'utilisation de ces tests. Des groupes de soutien se forment pour combler le manque de soutien psychologique dont souffrent les personnes victimes de ces révélations, comme le groupe Facebook DNA NPE Friends, où NPE signifie *not parent expected*, qui rassemble aujourd'hui plus d'un millier de personnes, un an après sa fondation.

Enfin, au-delà de ces découvertes fortuites, les tests d'origine peuvent être volontairement détournés pour confirmer ou infirmer des liens de parenté, notamment de paternité, et parfois sans que l'un des principaux intéressés en soit informé. Or les tests de paternité sont particulièrement fiables (voir l'encadré page 30).

LE RETOUR DES TESTS GÉNÉTIQUES DE SANTÉ EN ACCÈS LIBRE

Malgré ces réticences, les tests génétiques en accès libre portant sur les origines continuent leur essor... et ceux concernant la santé n'ont pas tardé à se développer de nouveau. Une décision de la FDA les a en effet remis en selle dès 2015. Le premier autorisé par l'agence était un test dit préconceptionnel pour le syndrome de Bloom, proposé par 23andMe. Cette maladie très rare, caractérisée par un retard de croissance et une susceptibilité accrue au cancer, est due à des mutations dans le gène *BLM*. Or on retrouve une mutation particulière dite BLM-Ash chez la plupart des malades d'origine juive ashkénaze (qui représentent un tiers des quelques centaines de cas décrits dans le monde). La maladie est par ailleurs récessive: seules les personnes qui ont reçu une mutation BLM-Ash à la fois de leur père et de leur mère sont atteintes. La société 23andMe a donc conçu un test recherchant la présence d'une copie de la mutation BLM-Ash, pour que les porteurs sains de mutations puissent en tenir compte lors d'un projet d'enfant. Si le conjoint est également porteur, le couple aura alors un risque de 25% d'avoir un enfant atteint.

Avec ces tests préconceptionnels – l'entreprise en propose aujourd'hui pour une quarantaine de maladies génétiques rares –, les clients ne sont pas amenés à prendre seuls des décisions, mais bien à se tourner vers des professionnels médicaux de la reproduction pour recourir à un diagnostic prénatal (un test génétique chez le fœtus en cours de grossesse) ou à un diagnostic préimplantatoire (un test génétique sur l'embryon avant implantation dans un parcours de fécondation *in vitro*) de façon à éviter la naissance d'un enfant atteint. Un encadrement médical existe donc bien cette fois.

Toutefois, en 2017, la FDA a fait évoluer sa doctrine pour des tests plus discutés. Elle a ainsi autorisé la commercialisation de dix tests de mesure de prédisposition génétique pour les maladies multifactorielles comme les maladies d'Alzheimer et de Parkinson, ou la maladie coeliaque. L'agence américaine précise que ces informations ne permettent pas de déterminer le risque absolu de maladie chez l'individu testé, mais qu'elles pourraient l'aider à prendre

Peu de sociétés alertent les usagers sur l'impact psychologique des tests



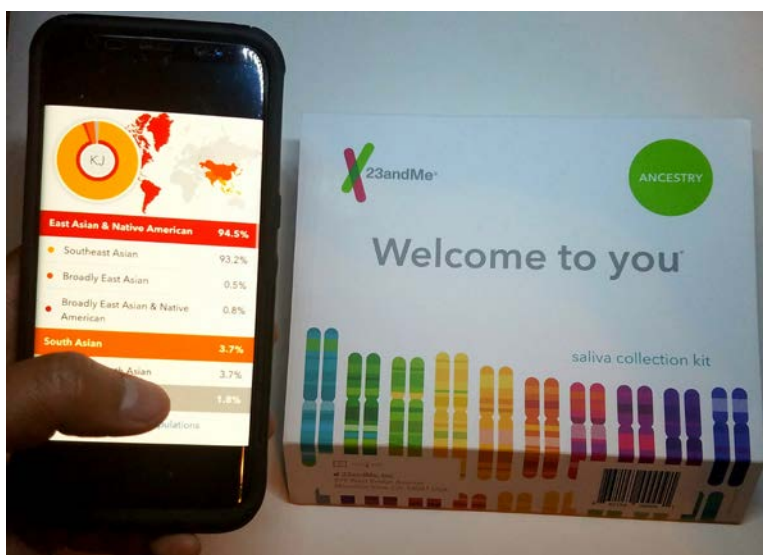
En mai 2013, l'actrice américaine Angelina Jolie a annoncé avoir subi une double mastectomie préventive à la suite du décès précoce de sa mère par cancer et de la détection d'une mutation du gène *BRCA1*. Son risque de développer un cancer du sein s'élevait à 87%. Cette annonce a incité nombre de femmes dans le monde à effectuer un dépistage des mutations des gènes *BRCA*. Aux États-Unis, où le recours au test *BRCA* est beaucoup moins encadré par les professionnels experts qu'en France du fait de son accès libre, la presse se fait régulièrement l'écho de femmes qui, comme la jeune Elisha Cooke-Moore en 2016, ont choisi de se faire retirer les seins et les ovaires de façon préventive après un test génétique et ont découvert par la suite que leur risque de cancer était en réalité très incertain.

DU TEST GENETIQUE AUX ORIGINES ETHNIQUES

Si les entreprises comme 23andMe vantent la simplicité de leurs tests génétiques portant sur les

tests est autrement plus complexe. La méthode consiste à examiner les centaines de milliers d'endroits variables du génome – des marqueurs SNP. L'opération revient ensuite, pour chaque segment du génome de l'individu, à rechercher la population humaine dans laquelle le profil de variation que présente l'individu est le plus fréquent. En considérant l'un après l'autre tous les segments du génome, des modèles statistiques permettent de sélectionner les populations les plus informatives

pour reconstruire l'ADN entier de l'individu, comme si l'on reconstruisait un puzzle en prenant dans chaque population existante ce qui ressemble le plus à chaque pièce originale du puzzle. Ces modèles permettent ainsi de déterminer les proportions de chaque population qui optimisent la reconstruction. Ces proportions sont ensuite interprétées comme les probabilités d'origine de l'ADN de l'individu. Ainsi, une personne verra l'origine de ses gènes localisée par exemple à 45 % en Angleterre, 31 % en Irlande/Écosse, 18 % dans la péninsule ibérique et 6 % en Inde, avec parfois un degré de précision étonnant : « Vous avez 0.2 % d'origine sicilienne »...



les décisions personnelles relatives à son mode de vie (mieux exercer sa mémoire, changer de régime alimentaire, faire du sport...). On voit, dans le choix des termes utilisés, qu'elle a en partie pris en compte les critiques précédentes sur la valeur des risques génétiques. Mais elle donne dorénavant la priorité au droit des individus à accéder à des informations génétiques personnelles et fait passer au second plan la protection contre le risque de fausse alerte ou de fausse angoisse, ou contre la multiplication d'actes médicaux d'utilité discutable, protection qu'assurait jusqu'alors l'intervention d'un professionnel.

Plus récemment encore, en 2018, la FDA a autorisé la commercialisation de tests pour rechercher la présence de trois mutations dans les gènes BRCA, qui prédisposent aux cancers du sein et de l'ovaire. Dans ce cas, la détection d'une mutation parmi les trois indique une

augmentation importante du risque de maladie, jusqu'à dix fois supérieur à celui des femmes qui ne les portent pas. En revanche, leur absence n'est pas interprétable, puisqu'il existe plus de mille mutations dans ces gènes, pour lesquelles la société 23andMe ne fournit aucune information. Aux États-Unis, avant cette autorisation, la prescription des tests BRCA et l'annonce des résultats étaient contrôlées par des professionnels de santé, eux-mêmes en charge des actions préventives à adopter en cas de test positif : renforcement du suivi des femmes ou ablation préventive des seins et des ovaires. En ouvrant l'accès direct de ces tests BRCA aux consommatrices, la FDA a donc franchi un pas supplémentaire pour sortir l'information génétique du contrôle médical. Celle-ci est devenue une donnée, avant tout personnelle, à laquelle les individus doivent avoir accès, s'ils le souhaitent, indépendamment de tout contexte de prise en charge médicale.

UNE INFORMATION COMME UNE AUTRE ?

Le droit français réserve un statut exceptionnel à l'information génétique. Les tests ne peuvent être réalisés qu'à des fins médicales ou de recherche scientifique, ou dans le cadre d'enquêtes judiciaires (voir l'encadré page 38). Dans toutes ces situations, la présence d'un professionnel dont les compétences sont reconnues et validées est aujourd'hui obligatoire pour décider du test, le réaliser et l'analyser.

Les raisons qui ont présidé à ces choix sont multiples. Elles ont toutefois largement à voir avec les effets collectifs de cette information biologique qui a la particularité d'être à la fois très stable dans le temps (l'ADN d'une personne ne varie pas au cours de sa vie) et partagée entre personnes d'une même famille et d'une même population. L'ADN est ainsi une donnée fort utile pour qui cherche à trier, sélectionner, discriminer, assigner à des individus une identité figée, sur la base d'informations biologiques pouvant être présentées comme « scientifiques ». C'est en outre une information bien plus fragile qu'elle n'en a l'air. Les liens entre risque de cancer du sein ou de l'ovaire et mutations dans les gènes BRCA en sont une bonne illustration.

Alors même que le test BRCA est proposé en routine clinique depuis la fin des années 1990, l'opération reste délicate. Avancer des prédictions de cancers fondées sur la seule analyse génétique, alors que le déterminisme de ces maladies est souvent plus complexe, requiert les précautions. Le faire pour des mutations qui n'ont pas toutes les mêmes conséquences sur le fonctionnement cellulaire complique encore la situation. En France, dès 1991, les professionnels médicaux de ce domaine, conscients de ces difficultés, se sont organisés

TESTS GÉNÉTIQUES DE SANTÉ : CE QUE LA LOI AUTORISE EN FRANCE



En France, les tests génétiques à des fins médicales peuvent être utilisés pour poser un diagnostic de maladie chez une personne, évaluer la susceptibilité d'une personne saine à développer une maladie ou adapter la prise en charge proposée à un patient (choix du traitement, dose prescrite...). Les tests doivent toujours être prescrits par un médecin, au cours d'une consultation individuelle pendant laquelle la personne est informée et signe un consentement écrit. Le résultat du test doit être communiqué par le médecin qui a fait la prescription. Lorsqu'est diagnostiquée une maladie génétique grave pour laquelle il existe des formes de prise en charge ou des mesures de prévention, la personne a l'obligation de prévenir ses proches potentiellement concernés.

La détection de quelques maladies génétiques est par ailleurs proposée à tous les nouveau-nés depuis 1972. Actuellement, cette détection concerne cinq maladies : la phénylcétonurie, l'hyperplasie congénitale des surrénales, l'hypothyroïdie congénitale, la

mucoviscidose et la drepanocytose. Des tests génétiques sont aussi possibles sur des fœtus en cours de grossesse (diagnostic prénatal) pour des maladies d'une particulière gravité, quand le couple risque de donner naissance à un enfant atteint ou quand des signes ont été détectés à l'échographie. En 2016, selon le rapport annuel de l'Agence de biomédecine, 2 500 fœtus ont été testés pour une maladie génétique autre que la trisomie 21, dont le dépistage est par ailleurs proposé à toutes les femmes.

Enfin, la loi autorise des tests génétiques sur des embryons avant implantation dans l'utérus de la mère (diagnostic préimplantatoire) pour des maladies d'une particulière gravité, incurables au moment du diagnostic. En 2016, 694 projets de grossesse ont ainsi fait l'objet d'un diagnostic préimplantatoire pour des couples dont le risque d'avoir un enfant atteint était élevé.

généralement, de la multiplication du recours aux tests génétiques, que ce soit en contexte médical ou policier (voir l'encadré page ci-contre). L'information génétique n'en serait plus qu'une parmi d'autres dans l'océan de données personnalisées sur notre biologie et nos modes de vie. Le droit à disposer de son information génétique individuelle serait du même ordre que celui de savoir ce que Google connaît de nous. Et même mieux, il nous permettrait de devenir encore plus acteurs que nous sommes déjà censés l'être de notre santé, du bonheur de nos enfants (en évitant d'être atteints de certaines maladies), de notre quête d'identité.

Dans ce récit lisse, largement porté par des discours de promesses que sous-tendent des intérêts économiques qu'il faut avoir en tête (voir l'encadré page 32), l'information génétique a une valeur donnée, fiable, scientifiquement validée. Peu de place est laissée aux difficultés, aux ajustements, aux incertitudes évoquées. Ou alors, il est considéré que les individus s'y adapteront, et les systèmes avec.

QUELLE LOI DE BIOÉTHIQUE VOULONS-NOUS ?

Les questions soulevées par les tests génétiques en libre accès se posent évidemment dans tous les pays. Mais tous n'entretiennent pas la même histoire avec la génétique. Ils n'ont pas fait les mêmes choix en matière d'organisation de leur système de santé. Ils n'ont pas tous la même confiance dans le marché pour organiser la vie sociale. Ils n'évaluent pas de la même façon la balance entre libertés individuelles et bien-être collectif. Dans un pays comme la France, où l'accès aux soins est pris en charge par une solidarité nationale, sous fortes tensions financières, on ne peut réfléchir à l'accès aux tests génétiques individuels sans penser aussi à ses conséquences sur le système de santé dans son ensemble, et notamment à celles de la multiplication d'actes médicaux liés à des tests génétiques réalisés en dehors de tout contexte clinique pertinent.

De même, autoriser le recours aux usages « récréatifs » de l'ADN requerrait de disposer des moyens pour contrôler que les interdictions en vigueur dans notre pays – interdiction de la discrimination sur la base de caractéristiques génétiques, en particulier pour les employeurs et les assurances – soient effectivement respectées. L'équilibre entre lien biologique et lien social, qui sous-tend notre droit de la famille, pourrait se voir fragilisé par la tendance à faire primer la « vérité biologique ». La généralisation des tests génétiques préconceptionnels *via* le diagnostic préimplantatoire et l'augmentation du recours à la fécondation *in vitro*, qui en est souvent un corollaire, impliquent de confier encore un peu plus nos projets reproductifs au contrôle des médecins. Un choix qui n'a rien

en un réseau national. Ce Groupe génétique et cancer a ainsi permis de proposer les tests BRCA sur tout le territoire national, tout en évaluant les pratiques. L'enjeu était de faire remonter toutes les difficultés et les solutions expérimentées de façon à gérer au mieux, collectivement, les nombreuses incertitudes associées à ces tests. De fait, si la mise en place de bases de données internationales dont la taille ne cesse de croître permet d'affiner les prédictions, elle ne réduit pas totalement l'incertitude. Le risque associé à certaines mutations reste toujours impossible à préciser et, pour d'autres, les estimations de risque sont évaluées à la baisse.

Aujourd'hui, toutefois, la spécificité de l'information génétique semble s'amoinrir du fait de l'explosion du marché des tests génétiques rendus aux consommateurs sur Internet et, plus

LES USAGES POLICIERS DE L'ADN S'ÉTENDENT

Depuis la mise au point des empreintes génétiques par le généticien britannique Alec Jeffreys, en 1985, la technique est utilisée en contexte policier. Cette méthode, qui consiste à comparer une empreinte génétique aux marqueurs microsatellites du génome, permet de distinguer suffisamment une personne d'une autre pour considérer que chacun de nous, à l'exception des vrais jumeaux, a une empreinte génétique unique.

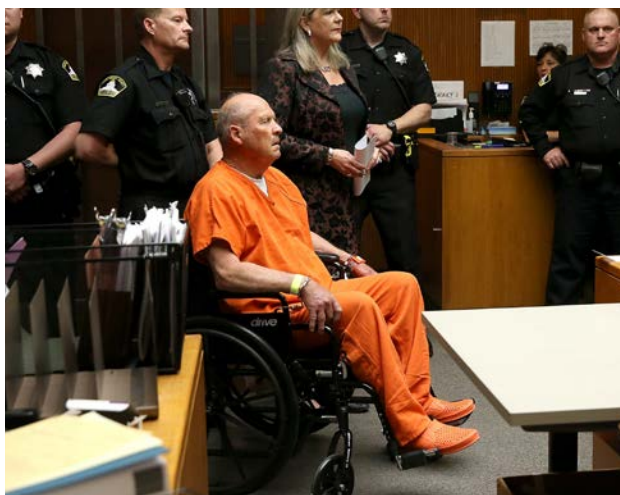
La réalisation d'empreintes à partir de traces biologiques retrouvées sur une scène de crime (sperme, cheveux, cellules mortes) permet parfois de rapprocher différentes enquêtes (mêmes empreintes retrouvées sur différentes scènes), ou d'identifier un nouveau suspect (mêmes empreintes sur une race et chez une personne testée). L'identité de deux empreintes ne prouve cependant pas la culpabilité du suspect : nous hérons en permanence des cellules mortes (cheveux, peau...) susceptibles de se retrouver sur la main d'une personne que nous avons saluée ou sur un mégot que nous avons jeté.

Depuis 1998, il existe en France un fichier automatisé des empreintes génétiques, le FNAEG, qui conserve les empreintes de toutes les personnes condamnées ou mises en cause pour une série de crimes et de délits. Aujourd'hui, ce fichier contient près de 3 millions d'empreintes génétiques, dont 75 % correspondent à des personnes mises en cause, mais non condamnées. En pratique, lorsqu'une empreinte est réalisée sur un échantillon prélevé sur une scène de crime, la loi française autorise de la comparer à toutes les empreintes présentes dans le FNAEG pour rechercher une correspondance et identifier ainsi un nouveau suspect. Depuis quelques années, il est également autorisé de rechercher si une empreinte du FNAEG, à défaut de correspondre exactement à l'empreinte identifiée, serait celle d'un parent ou d'un enfant biologique.

En 2018, l'arrestation par la police californienne de Joseph James DeAngelo a étendu encore ce principe. Pour identifier ce présumé meurtrier, violeur et voleur multirécidiviste recherché depuis le début des années 1970, les policiers ont en effet comparé l'ADN retrouvé sur plusieurs scènes de crime avec celui d'un site de généalogie génétique. Ils ont repéré une bonne

dozaine de personnes pouvant être de lointains cousins de la personne recherchée. En suivant les liens de parenté entre ces personnes, ils ont identifié un ancêtre commun vivant au début du XIX^e siècle. La reconstruction de la descendance de cet ancêtre – plus de 1 000 personnes – a permis d'affiner les recherches, jusqu'à l'identification de cet ancien policier de 73 ans.

Enfin, depuis un arrêt de la cour de Cassation de 2014, les enquêteurs sont autorisés, en France, à faire analyser une trace génétique pour obtenir des informations sur l'apparence de la personne correspondante : couleur de la peau, des cheveux, les yeux, origine biogéographique. La fiabilité de ces « portraits robots génétiques » reste toutefois assez discutée.



Joseph James DeAngelo, auteur présumé d'au moins douze meurtres, une cinquantaine de viols et une centaine de cambriolages en Californie entre 1974 et 1986, a été identifié en 2018 par comparaison de l'ADN trouvé sur le terrain avec la base de données génomiques GEDmatch.

l'automatique. Cela pourrait renforcer encore la pression sociale qui s'exerce déjà sur les couples en les poussant à utiliser tous les moyens technologiques disponibles pour faire naître des enfants « en bonne santé », pour optimiser encore la sélection de vies considérées comme « valant le coup d'être vécues ».

Ces interrogations, qui sont loin d'épuiser le sujet, sont importantes au moment où le Parlement français s'apprête à examiner le nouveau projet de loi de bioéthique, dont un volet concerne les examens génétiques et la médecine génomique. D'autant que les progrès dans le domaine sont loin de se tarir.

Avec la révolution biotechnologique que représente le séquençage de nouvelle génération (NGS, pour *next generation sequencing*), qui permet de séquencer de grandes quantités d'ADN en des temps record, le coût de séquençage d'un génome humain a chuté de manière drastique cette dernière décennie. Alors que celui du premier génome humain avait coûté 3 milliards de dollars et duré 13 ans entre 1990 et 2003 avec des séquenceurs de type Sanger, un séquenceur NGS Illumina HiSeq X offre le

même résultat en une journée pour 1 000 dollars. La société Illumina a déjà promis le génome à 100 dollars d'ici à 2020 avec le nouveau séquenceur Illumina NovaSeq. De jeunes entreprises américaines de génomique comme Helix, Veritas Genetics ou Genecov visent par ailleurs à dépasser l'usage des puces à ADN, préconisé par les leaders actuels du marché des tests génétiques, pour rendre accessible au grand public le séquençage complet de leur génome. En 2018, deux entrepreneurs du secteur, Razib Khan et David Mittelman, soutenaient déjà, dans la revue *Genome Biology*, que l'ère des puces de SNP des années 2010 serait supplantée par la révolution du séquençage complet des génomes qui s'opérerait au grand jour dans les années 2020. Selon eux, le génome complet de 60 millions d'Américains sera séquencé d'ici à 2025. Si ces informations plus exhaustives contribueront à augmenter la précision des résultats des tests génétiques, elles augmenteront surtout la valeur commerciale des bases de données privées des entreprises qui, d'ores et déjà, font saliver les laboratoires pharmaceutiques. ■

BIBLIOGRAPHIE

P. Ducournau, *S'entreprendre avec les gènes : Enquête sur l'auto-généralisation*, PUR, 2018.

M. Mathieu et P. Malzac, *Tests génétiques : illusion ou prédiction ?*, Le Muscadier, 2017.

C. Bourgain et P. Dartu, *ADN superstar ou superflü ? Les citoyens face à une molécule envahissante*, Le Seuil, 2013.

L'ESSENTIEL

► Quand des étoiles massives épuisent leur combustible, elles s'effondrent en laissant parfois derrière elles un vestige extrêmement compact : une étoile à neutrons.

► A l'intérieur d'un tel astre, la gravité comprime la matière au point

de transformer la plupart des protons en neutrons. Mais on ignore quelle forme prend exactement la matière dans ces étoiles.

► Les neutrons s'apparentent peut-être pour créer un « superfluide » de viscosité nulle, ou se scindent en quarks et gluons, leurs composants élémentaires.

► Des observatoires capables de détecter les ondes gravitationnelles émises lors des collisions d'étoiles à neutrons et d'autres expériences apporteront de nouvelles lumières sur ces objets mystérieux.

L'AUTEUR



CLARA MOSKOWITZ
cheffe des rubriques
physique et espace
du magazine
Scientific American

Au cœur des étoiles à neutrons

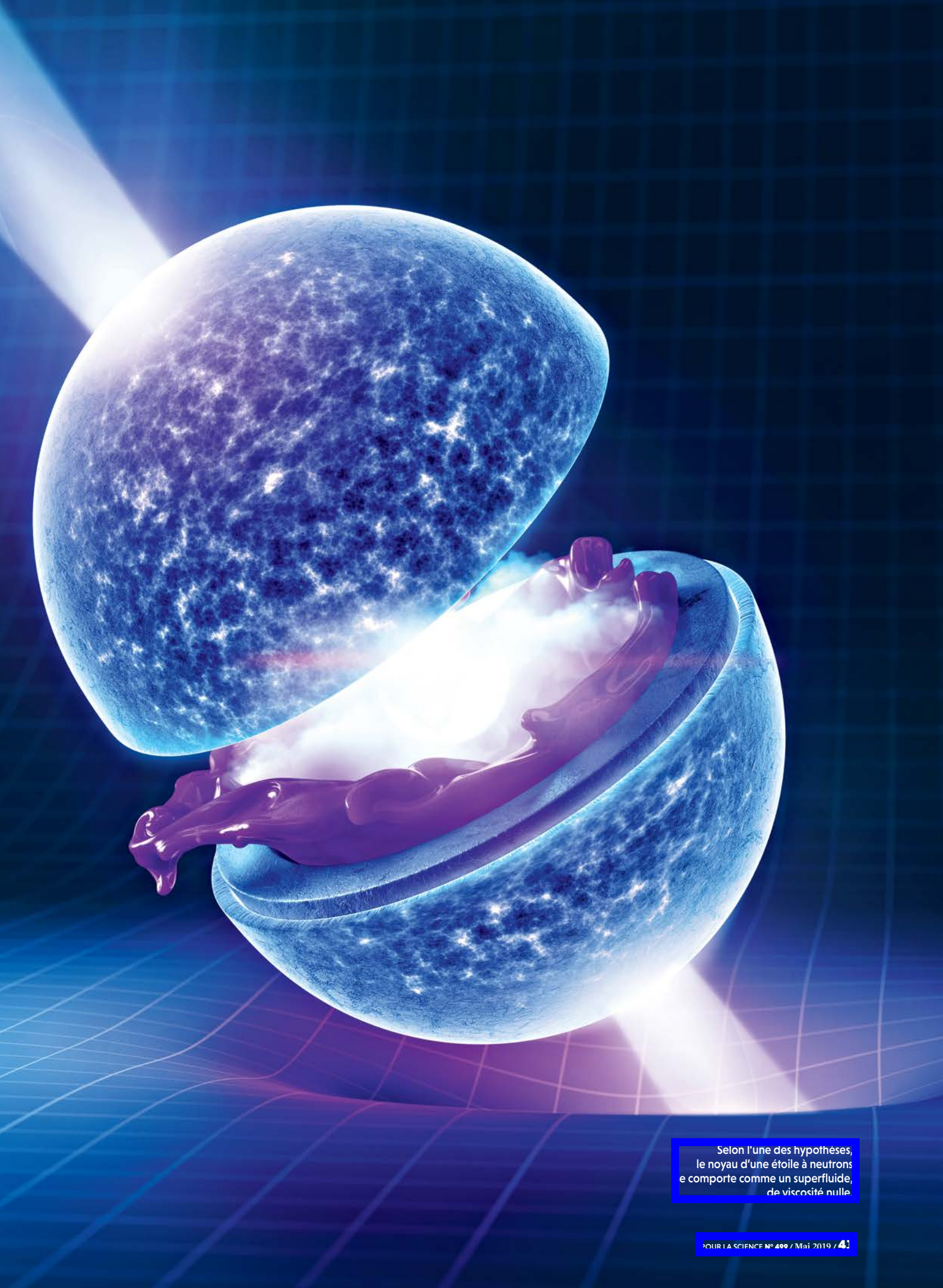
A l'intérieur des étoiles à neutrons règne une densité extrême, parmi les plus élevées de l'Univers. Sous quelle forme la matière s'y trouve-t-elle ? Superfluide de neutrons ? Quarks étranges ? De nouveaux indices éclairent cette vieille énigme.

Lorsqu'une étoile vingt fois plus massive que le Soleil meurt, elle devient une étoile à neutrons, un corps de la taille d'une grande ville et d'une densité extrême. « L'objet le plus insensé qui soit, mais dont la plupart des gens n'ont jamais entendu parler », commente l'astrophysicien Zaven Arzoumanian, qui travaille au centre de vol spatial Goddard de la Nasa. Ainsi, un morceau d'étoile à neutrons de la taille d'une balle de ping-pong pèserait plus d'un milliard de tonnes. Sous la surface de l'étoile, écrasés par la gravité, la plupart des protons et des électrons fusionneraient pour former des neutrons, d'où le nom de ces astres. Du moins est-ce l'image que les astrophysiciens se font de ces objets. Mais la question est loin d'être réglée.

La densité au sein d'une étoile à neutrons serait comparable à celle d'un noyau atomique, environ 10^{17} kilogrammes par mètre cube, une densité que certaines expériences en laboratoire commencent seulement à reproduire. Avec des conditions aussi extrêmes, la

structure interne de ces objets reste quasiment inconnue. « Ces objets présentent la plus forte densité stable de la matière, permise par les lois de la nature mais sous une forme que nous ne comprenons pas encore », explique Zaven Arzoumanian. C'est aussi la forme de matière subissant la plus forte gravité que l'on connaisse : si l'on y ajoutait un tout petit peu plus de masse, une étoile à neutrons se transformerait en un trou noir, objet qui déforme tellement l'espace-temps environnant que même la lumière ne peut s'en échapper.

Différentes hypothèses courent sur la structure interne des étoiles à neutrons. Certaines suggèrent que le cœur de ces astres est tout simplement rempli d'une phase dense de nucléons (les composants des noyaux atomiques), avec très majoritairement des neutrons et quelques protons de-ci de-là. D'autres scénarios reposent sur des configurations plus exotiques. L'une des possibilités est un mélange de nucléons et de particules moins courantes, les hyperons. Ces derniers ont été découverts dans les années 1950, grâce aux accélérateurs de particules et aux expériences associées. Les



Selon l'une des hypothèses,
le noyau d'une étoile à neutrons
se comporte comme un superfluide,
de viscosité nulle.

nucléons et les hypérons appartiennent à la famille des particules composites nommées baryons et formées chacune de trois quarks: le proton contient deux quarks *u* et un quark *d*, le neutron deux *d* et un *u*, tandis qu'un hypéron est formé d'au moins un quark *s*, une version plus massive et instable du quark *d*. Le noyau de l'étoile à neutrons pourrait aussi contenir des mésons, particules composées d'un quark et d'un antiquark. Mais, encore plus exotique, les neutrons pourraient se dissoudre complètement en libérant les quarks et les gluons (les particules vectrices de l'interaction forte, à laquelle sont sensibles les quarks), qui formeraient une sorte de mer (un « plasma ») de particules évoluant librement les unes par rapport aux autres.

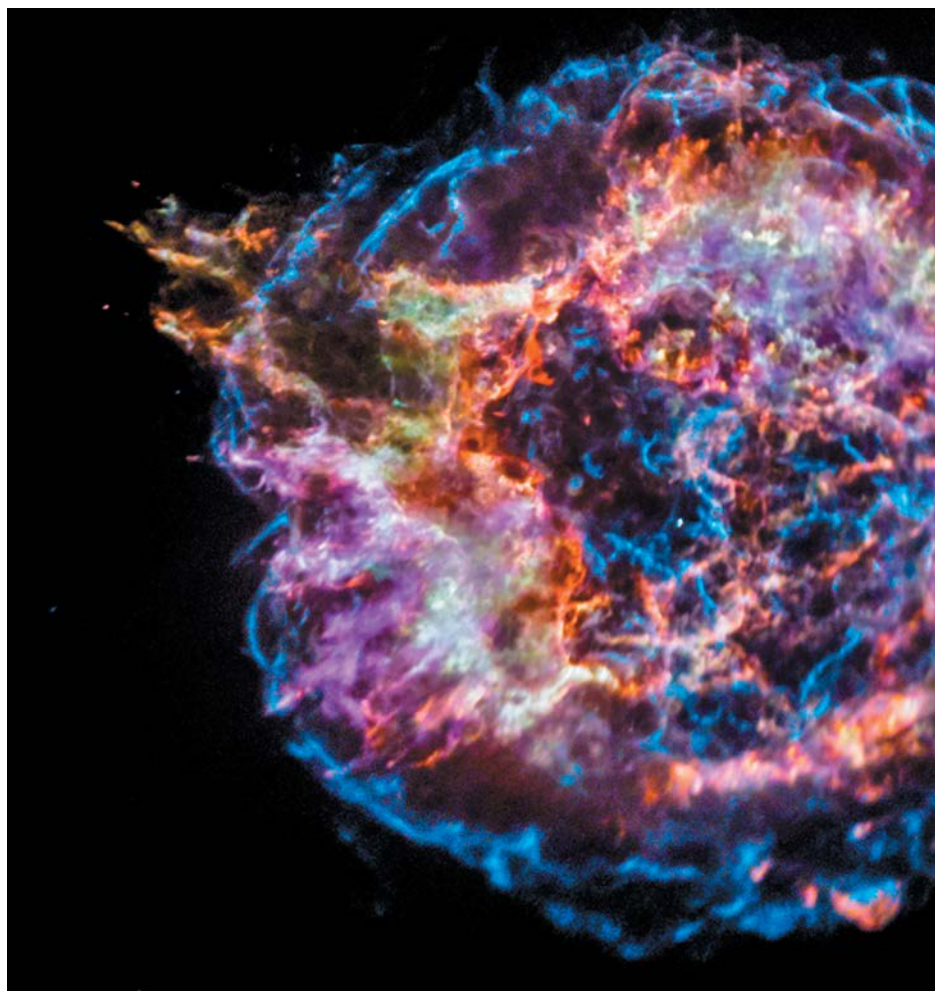
Faute de pouvoir ouvrir une étoile à neutrons et regarder à l'intérieur, il est difficile de trancher entre ces hypothèses. Mais une percée importante a été réalisée en août 2017, quand deux observatoires terrestres ont détecté des ondes gravitationnelles (des vibrations de l'espace-temps) vraisemblablement émises lors de la coalescence de deux étoiles à neutrons. Ces ondes étaient porteuses d'informations sur la masse et la taille des deux astres juste avant leur collision. Les physiciens ont utilisé ces données pour établir de nouvelles limites sur les propriétés et les compositions possibles des étoiles à neutrons.

De nouveaux indices nous parviennent aussi de l'expérience *Nicer* (*Neutron star interior composition explorer*), qui a démarré en juin 2017 sur l'ISS, la *Station spatiale internationale*. L'objectif de cette expérience est d'observer des pulsars, c'est-à-dire des étoiles à neutrons en rotation rapide, dotées d'un fort champ magnétique et émettant des faisceaux lumineux qui en font les « phares de l'Univers ». Quand ces faisceaux balayent la Terre, nous voyons les pulsars cligner jusqu'à 700 fois par seconde.

Grâce à ces expériences, et d'autres encore, nous avons enfin des raisons d'espérer en savoir davantage sur la structure interne des étoiles à neutrons, mais aussi sur le comportement de la matière dans des conditions extrêmes.

UNE NAISSANCE EXPLOSIVE

Les étoiles à neutrons naissent au cœur de cataclysmes cosmiques, les supernovæ. Quand une étoile massive épuise son combustible nucléaire, elle ne peut plus soutenir son propre poids et l'astre finit par s'effondrer. Par la violence du processus, ses couches externes sont soufflées dans l'espace, tandis que son cœur, principalement constitué de fer à ce stade de la vie de l'étoile, est comprimé. La gravité est telle qu'elle écrase littéralement les atomes, poussant les électrons à l'intérieur du noyau jusqu'à ce qu'ils fusionnent avec les protons pour former des neutrons. « Le fer est comprimé d'un facteur 100 000 dans toutes les



directions», explique Mark Alford, physicien à l'université Washington, à Saint Louis. « L'atome d'une taille d'un dixième de nanomètre se transforme en un paquet de neutrons de quelques femtomètres de diamètre. » [Un femtomètre, soit 10^{-15} mètre, représente un milliardième de nanomètre, qui correspond lui-même à un milliardième de mètre.] C'est comme si la Terre était réduite aux dimensions d'un pâté de maisons. À la fin de l'effondrement, le vestige de l'étoile contient une vingtaine de neutrons pour chaque proton.

« L'étoile à neutrons est d'une certaine façon comparable à un unique noyau atomique géant, dit James Lattimer, astronome à l'université de Stony Brook, avec une différence essentielle: les interactions nucléaires assurent la cohésion dans un noyau tandis que ce rôle est assuré par la gravitation dans l'étoile à neutrons. »

Dès 1934, l'Allemand Walter Baade et l'Américano-Suisse Fritz Zwicky avaient été les premiers à imaginer qu'une supernova donnerait naissance à une étoile à neutrons. Cela ne faisait que deux ans que le physicien britannique James Chadwick avait découvert le neutron et de nombreux scientifiques étaient sceptiques sur l'existence d'un objet

Cassiopee A est le vestige d'une ancienne supernova. Au milieu du gaz expulsé lors de l'explosion, une étoile à neutrons s'est formée. Le refroidissement de cet astre est plus rapide que prévu. Une explication possible est qu'un superfluide de neutrons serait en train de se former.



La densité au cœur d'une étoile à neutrons serait 4 à 6 fois celle des noyaux atomiques

aussi extrême qu'une étoile à neutrons. C'est seulement en 1967, lorsque Jocelyn Bell Burnell, alors en thèse à l'université de Cambridge, au Royaume-Uni, et ses collègues ont observé des pulsars (et que des chercheurs ont déterminé l'année suivante que ces pulsars devaient être des étoiles à neutrons en rotation) que l'idée s'est imposée.

D'après les astrophysiciens qui les étudient, les étoiles à neutrons auraient une masse comprise entre 1 et 2,5 fois celle du Soleil. Elles comporteraient au moins trois couches. La couche externe est une «atmosphère» gazeuse d'hydrogène et d'hélium de quelques centimètres d'épaisseur. Elle flotte au-dessus d'une «croûte» externe d'environ un kilomètre d'épaisseur et constituée de noyaux atomiques de fer disposés selon une structure cristalline, avec des neutrons et des électrons entre eux.

Le reste de l'astre, plus en profondeur, fait l'objet de davantage de spéculations. À mesure qu'on se rapproche du centre, la pression augmente et chaque noyau atomique renferme alors davantage de neutrons. Mais à partir d'un certain seuil, les noyaux saturent en neutrons, si bien qu'ils débordent: il ne s'agit plus de noyaux, mais juste d'un liquide de neutrons et de protons. Finalement, au plus profond de l'étoile, dans le noyau interne, il se pourrait bien qu'eux aussi se délitent. «Nous ne pouvons que spéculer sur cet état de la matière, car nous ne savons pas ce qui se passe avec des pressions et des densités aussi folles», commente Mark Alford. Au cœur de l'astre, dans le noyau interne, la densité pourrait

rouvaient poussés suffisamment près les uns les autres, ils formeraient des «paires de Cooper», à l'instar des électrons dans les matériaux supraconducteurs.

Un quark est un fermion, c'est-à-dire une particule dont le spin (moment cinétique intrinsèque) a, dans les unités appropriées, une valeur demi-entière ($1/2$ ou $3/2$, $5/2$, etc.). Un système de deux quarks se comporte comme un boson, une particule de spin entier (0 , 1 , etc.). Or les fermions et les bosons ne suivent pas les mêmes règles. Les premiers se conforment au principe d'exclusion de Pauli, selon lequel deux fermions identiques ne peuvent pas être dans le même état quantique. Les bosons ne sont pas soumis à une telle restriction. Individuellement, les quarks d'une étoile à neutrons sont obligés d'occuper des énergies toujours plus élevées pour satisfaire à la fois le principe d'exclusion de Pauli et la densité écrasante. Mais associés en paires pour former des bosons, ils peuvent rester dans l'état de plus basse énergie (la configuration privilégiée de tout système physique) et néanmoins s'entasser. Et dans ce cas, les paires de quarks forment un superfluide.

UN CŒUR SUPERFLUIDE

Même en dehors du cœur, dans le noyau externe, où les neutrons seraient encore intacts, ces derniers pourraient aussi s'apparier pour former un superfluide. En fait, les scientifiques sont quasiment certains que les neutrons se comportent ainsi. Les preuves viennent de l'observation des «glitches» des pulsars, des épisodes où la rotation de l'étoile à neutrons accélère soudainement.

Les théoriciens pensent que ces glitches se produisent quand la vitesse de rotation de l'étoile dans son ensemble se désynchronise de la rotation du superfluide sous la croûte. Globalement, la rotation de l'étoile ralentit naturellement au fil du temps car l'astre perd de l'énergie par l'émission d'un rayonnement électromagnétique et d'un vent stellaire; au contraire, le superfluide, qui s'écoule sans friction, ne ralentit pas. La contrainte mécanique engendrée par la différence de vitesse entre les deux couches emmagasine de l'énergie, laquelle se libère brutalement sous la forme de moment cinétique, ce qui réaccélère l'étoile. «C'est comme un tremblement de terre, explique James Lattimer; vous avez un hoquet et un sursaut d'énergie; la fréquence de rotation augmente brièvement avant de rediminuer.»

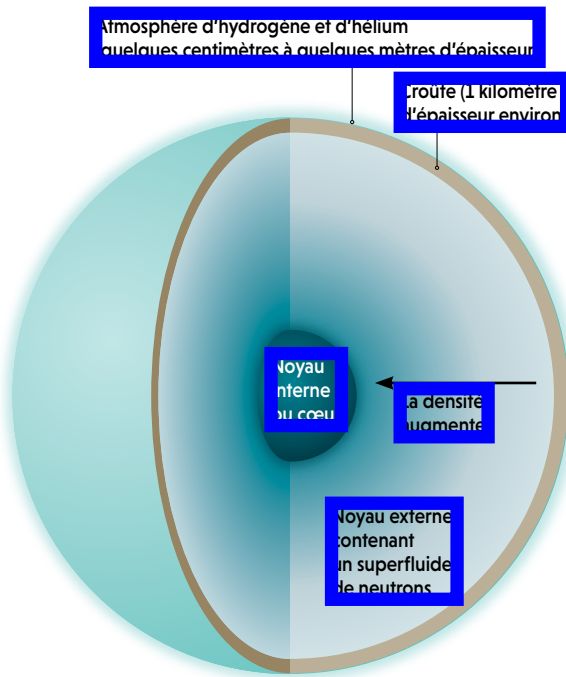
En 2011, James Lattimer et ses collègues ont affirmé avoir trouvé des indices de superfluidité dans le cœur d'une étoile à neutrons, mais le chercheur admet que le débat reste ouvert. Son équipe, dirigée par Dany Page, de l'université nationale autonome du Mexique, a analysé les données de quinze ans d'observation en rayons X de Cassiopeia A (voir la photo ci-contre).

être 4 à 6 fois supérieure à celle des noyaux atomiques. «Il se peut que les neutrons soient écrasés les uns contre les autres et qu'on ne puisse plus vraiment parler d'un fluide de neutrons, mais d'un fluide de quarks.»

A quoi ressemble ce fluide? Une possibilité est que ces quarks forment un «superfluide», dépourvu de viscosité et qui, une fois mis en mouvement, ne s'arrêtera théoriquement jamais de bouger. Cet étrange état de la matière est envisageable car les quarks ont une affinité pour les autres quarks, et s'ils se

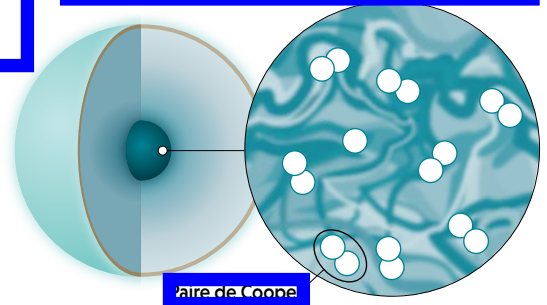
À L'INTÉRIEUR D'UNE ÉTOILE À NEUTRONS

Les étoiles à neutrons sont une énigme. On sait que leur surface est constituée d'une mince atmosphère gazeuse d'atomes lourds (surtout du fer). Mais sous ces couches, la nature de la matière, que l'on suppose constituée principalement de neutrons, reste mal connue. À l'intérieur du cœur dense, la forme que revêtent ces neutrons, et leur possible décomposition en quarks et gluons, reste une question ouverte.



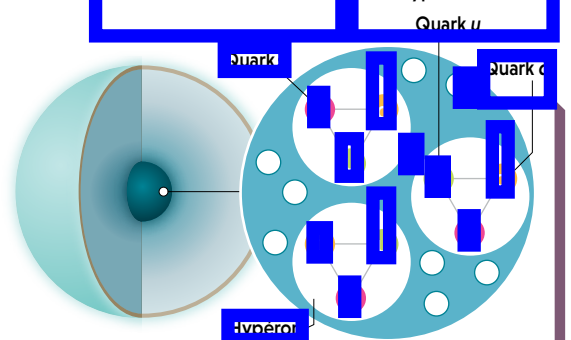
LE CŒUR : HYPOTHÈSE DES MERS SUPERFLUIDES

Une possibilité est que les nucléons se transforment en un plasma de quarks et de gluons dans le noyau interne. Les quarks seraient alors tellement serrés qu'ils s'associeraient par deux pour former des « paires de Cooper ». Ces paires créent un « superfluide » qui s'écoule sans résistance.



LE CŒUR : HYPOTHÈSE DES QUARKS ÉTRANGES

L'incroyable densité pourrait également entraîner la transformation des quarks du noyau interne, habituellement de types *u* ou *d*, en quarks exotiques *s*. Si les quarks se trouvent encore au sein de neutrons, les neutrons deviendraient alors des hyperons.



Le vestige d'une supernova devenue visible au début du XVII^e siècle. Les astronomes ont trouvé que le pulsar au centre de la nébuleuse se refroidissait plus vite que la théorie ne le suggère.

Une explication serait qu'au début de la formation du superfluide, beaucoup de neutrons s'appariaient, mais que ces paires, instables, se dissocieraient et se reformeraient souvent. Cette activité s'accompagnerait d'une importante émission de neutrinos vers l'espace. Ces particules emporteraient une grande quantité d'énergie, d'où le refroidissement plus rapide que prévu de l'astre. « C'est quelque chose que nous n'aurions jamais imaginé voir », commente James Lattimer. Mais par chance, cette étoile a juste l'âge qu'il faut pour voir cet effet. La confirmation viendra dans une cinquantaine d'années si l'astre commence à se refroidir plus lentement, parce qu'une fois que le superfluide est constitué, il ne reste plus l'excédent d'énergie à perdre ».

Les étoiles à neutrons pourraient ainsi héberger un superfluide dans leur noyau externe

et interne. Ils pourraient aussi abriter de la matière dite étrange car elle contiendrait des quarks *s*, ou étranges (*s* pour *strange* en anglais).

DE LA MATIÈRE « ÉTRANGE » ?

Il existe six sortes, ou « saveurs », de quarks : *u*, *d*, *c*, *s*, *t* et *b*. On ne trouve dans les atomes que les deux plus légers, *u* et *d*. Les autres saveurs sont plus massives et instables. Elles apparaissent, par exemple, dans les collisions de particules à hautes énergies dans des collisionneurs tels que le LHC (*Grand collisionneur de hadrons*) du Cern, près de Genève. Mais dans l'intérieur très dense des étoiles à neutrons, les quarks *u* et *d* contenus dans les neutrons se transformeraient parfois en quarks *s* (les autres saveurs sont tellement massives qu'elles ne se formeraient probablement pas même dans ces conditions extrêmes). Si des quarks *s* apparaissent et restent liés aux autres quarks, cela produira des hyperons.

Enfin, il est aussi possible que ces quarks soient présents dans le plasma de quarks et de

gluons. Les expériences dans les accélérateurs de particules nous permettraient d'en savoir plus sur les conditions nécessaires pour l'apparition des hypérons, par exemple. Dans le cas du plasma de quarks et de gluons, l'expérience *Alice*, au LHC, est dédiée à l'étude de cet état de la matière. Mais ce plasma artificiel est obtenu pour une température élevée et une densité très faible, loin des conditions du cœur d'une étoile à neutrons, dont la température est relativement faible et la densité élevée. Des expériences de collisions d'ions lourds au *Ganil*, à Caen, dans les accélérateurs *Fair*, à Darmstadt, en Allemagne, ou *Nica*, à Doubna, en Russie, s'approcheront davantage des conditions de densité des étoiles à neutrons (voir l'encadré page suivante).

Une autre façon d'identifier la composition du cœur d'une étoile à neutrons consiste à remarquer que la structure interne de l'astre influe sur sa taille. En effet, dans le cas de neu-

trons, ainsi que la façon dont le champ gravitationnel intense de ces étoiles déforme la trajectoire des photons, les chercheurs calculeront la masse et le rayon des pulsars et pourront les comparer. «Si *Nicer* trouve des étoiles de masses assez proches mais de rayons très différents, cela voudrait dire qu'il se passe quelque chose de bizarre», explique Mark Alford, comme une transition de phase entre deux formes de matière, qui ferait rétrécir l'étoile. Une telle transition pourrait se produire, par exemple, quand les neutrons se décomposent en quarks et en gluons.

Mesurer la taille des étoiles à neutrons est utile pour resserrer l'éventail des formes que peut y revêtir la matière. Les spécialistes ont longtemps pensé que la moitié des neutrons d'un tel astre se transformaient en hypérons; les calculs théoriques suggéraient alors qu'une étoile à neutrons ne pourrait pas dépasser 1,5 masse solaire. Mais en 2010, Paul Demorest, de l'Observatoire américain de radioastronomie, en Virginie, et son équipe ont découvert une étoile à neutrons de 1,97 masse solaire, ce qui contredisait la prédiction initiale. Aujourd'hui, les physiciens estiment que les hypérons constituent 10% au plus du contenu d'une étoile à neutrons.

De nouvelles et très différentes observations pourraient nous en apprendre encore plus sur les étoiles à neutrons. Depuis des années, les télescopes détectent des flashes de lumière, qu'on nomme des sursauts gamma, dont les chercheurs soupçonnent qu'ils résultent de collisions entre deux étoiles à neutrons. Un tel événement a été confirmé le 17 août 2017: deux dispositifs, *Ligo* (*Laser Interferometer gravitational-wave observatory*, installé dans l'État de Washington et en Louisiane) et *Virgo* (près de Pise, en Italie) ont détecté simultanément des ondes gravitationnelles émises par une paire d'étoiles à neutrons spiralant l'une autour de l'autre avant de se percuter violemment et fusionner.

DES INFORMATIONS PAR LES ONDES GRAVITATIONNELLES

Jusqu'à cette date, toutes les ondes gravitationnelles détectées (la première a été enregistrée en 2015) avaient été le résultat de la fusion de deux trous noirs. Or un tel processus n'émet pas de rayonnement électromagnétique, contrairement à la coalescence de deux étoiles à neutrons. L'événement du 17 août 2017 est unique en son genre, pour l'instant, mais la détection de ses ondes gravitationnelles et de ses émissions électromagnétiques par plusieurs télescopes a apporté de nombreuses informations sur la façon dont s'est déroulée la collision. Une aubaine pour étudier la physique des étoiles à neutrons. «J'étais complètement époustoufflé», confie

On estime aujourd'hui qu'une étoile à neutrons ne contient pas plus de 10% d'hypérons

trons intacts à l'intérieur du cœur, ceux-ci agiraient «comme des billes et constitueraient un cœur dur et compact», explique Zaven Arzumanian. Le cœur compact aurait tendance à repousser les couches externes et à augmenter la taille de l'étoile dans son ensemble. À l'inverse, si les neutrons se dissolvaient en une soupe de quarks et de gluons, l'étoile serait plus petite, «plus molle et compressible». C'est cette piste qui est explorée avec l'expérience *Nicer*. «L'un des principaux objectifs est de mesurer la masse et le rayon (de l'étoile à neutrons)», explique Zaven Arzumanian, coresponsable et directeur scientifique de l'expérience *Nicer*, ce qui nous aidera à éliminer certaines théories.»

L'expérience *Nicer* se présente comme une boîte de la taille d'une machine à laver installée à l'extérieur de la *Station spatiale internationale*. Elle scrute plusieurs dizaines de pulsars répartis sur l'ensemble du ciel, et détecte les photons X qui en proviennent. En mesurant les temps d'arrivée et les énergies de ces photons,

RECREE DE LA MATIÈRE D'ÉTOILE À NEUTRONS EN LABORATOIRE

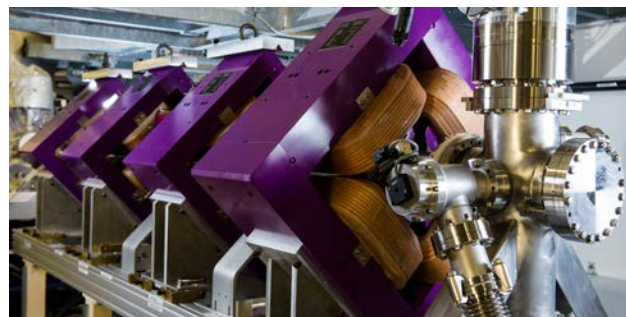
Les conditions extrêmes régnant dans une étoile à neutrons sont

reproduites en laboratoire. La densité supérieure à celle des noyaux atomiques ne peut être reproduite que lors de collisions entre des noyaux lourds, contenant beaucoup de protons et de neutrons (de l'or ou du plomb par exemple). Plusieurs collisionneurs visent à s'approcher au plus près des densités typiques du cœur des étoiles à neutrons, près de cinq fois la densité des noyaux atomiques.

L'installation *Spiral2*, inaugurée en 2016 au *Ganil* Grand accélérateur national

d'ions lourds), à Caen, est un instrument qui peut faire entrer en collision des noyaux exotiques contenant plus de neutrons que les noyaux naturels. Le projet *Nica*, en construction à Doubna, en Russie, et prévu pour 2020, vise l'étude du plasma de quarks et de gluons, et la transition entre la matière nucléaire et ce plasma, grâce à des collisions entre des ions d'or. Enfin, le projet *Fair*, près de Darmstadt, en Allemagne, prévu pour 2025, atteindra les vitesses d'ions plus élevées que les deux autres, donc des densités d'énergie supérieures.

Si ces expériences vont nous apporter de nombreuses informations sur la matière dans des conditions extrêmes, elles seront insuffisantes pour déterminer la nature exacte de la matière dans les étoiles à neutrons. En effet, les densités atteintes seront dans la bonne gamme, mais la violence du choc entre les noyaux fait monter la température, qui est ainsi bien supérieure à celles régnant dans ces astres.



L'installation *Spiral2*, au *Ganil*, est constituée d'un accélérateur linéaire et de salles d'expériences. À partir d'ions légers ou lourds, il produit des noyaux exotiques pour mieux étudier la matière dans des conditions extrêmes.

Ensuite, la matière ultradense créée représente une quantité infime comparée aux 10³⁰ kilogrammes d'une étoile à neutrons. Et sa durée de vie est très éphémère, alors qu'une étoile à neutrons est stable pendant des centaines d'années au moins, d'après les études sur des pulsars. Enfin, même dans le cas des noyaux exotiques du *Ganil*, on est loin d'atteindre la composition des étoiles à neutrons, qui est d'une vingtaine de neutrons pour un proton. Un tel rapport peut avoir une incidence

importante sur les propriétés de la matière

Les résultats seront néanmoins intéressants et il ne faut pas oublier qu'ils ne représentent qu'une fraction de l'activité de recherche de ces installations, où l'on étudie aussi bien les propriétés fondamentales de la matière que l'ingénierie des matériaux, la chimie, la biologie ou la médecine.

EROME NOVAK
Laboratoire Luth,
CNRS-Observatoire de Paris

James Lattimer. « Je pensais que c'était juste un bon beau pour être vrai ».

L'analyse des signaux a montré que l'événement résultait de la collision d'une paire d'étoiles à neutrons située à environ 130 millions d'années-lumière de la Terre, chacune d'environ 1,4 masse solaire et de rayon compris entre 11 et 15 kilomètres avant la collision. Avec ces données, les scientifiques affinent les contraintes sur l'équation d'état des étoiles à neutrons. Cette équation, qui devrait s'appliquer à toutes les étoiles à neutrons de l'Univers, décrit la densité de la matière en fonction de la pression et de la température dans l'astre. Les théoriciens en ont proposé diverses formes, correspondant aux différentes hypothèses sur la nature de la matière au sein de ces astres, et ces nouvelles mesures ont été l'occasion d'écarter certaines.

Le rayon estimé pour les deux étoiles à neutrons détectées par *Ligo* et *Virgo* est relativement petit par rapport à leur masse. Ce résultat a surpris les astrophysiciens, car il met en difficulté certaines théories décrivant ces astres. Il n'est pas aisé d'inclure à la fois des étoiles à neutrons compactes et celles très massives, comme celle de 1,98 masse solaire, dans une même équation d'état. « Cela devient compliqué de satisfaire toutes les contraintes des observations avec une équation d'état

bonne », note Jocelyn Read, astrophysicienne à l'université d'État de Californie à Fullerton, qui codirige l'équipe Matière extrême de *Ligo*. « Essayer de faire des étoiles compactes, tout en expliquant des étoiles massives, devient un défi pour la théorie. C'est vraiment intéressant, et cela pourrait le devenir encore plus ».

Jusqu'à présent, *Ligo* et *Virgo* n'ont détecté que cette unique collision d'étoiles à neutrons, mais une autre observation analogue pourrait survenir à tout moment, les deux complexes de détection venant de reprendre leur campagne d'observations. « Je travaille depuis assez longtemps dans ce domaine, dit Jocelyn Read, et c'est tout simplement fantastique de dépasser l'époque des vœux pieux : "Et si nous pouvions voir des ondes gravitationnelles, nous pourrions faire ceci ou cela. Et si... Et si..." Maintenant, nous avons enfin la possibilité de faire ce dont nous rêvions. »

DES INDICES A LA PORTEE DES DÉTECTEURS DE DEMAIN

Avec l'amélioration progressive de la sensibilité des détecteurs d'ondes gravitationnelles, les physiciens espèrent mettre leurs modèles encore plus à l'épreuve. Par exemple, une des façons de tester ce qu'il y a à l'intérieur d'une étoile à neutrons consiste à regarder les ondes gravitationnelles émises par un éventuel

liquide tourbillonnant en son sein; si le liquide a une viscosité très faible, voire nulle (comme un superfluide), il s'écoulera suivant certains régimes, des « modes r », où des ondes gravitationnelles sont émises. « Ces ondes gravitationnelles seraient beaucoup plus faibles que celles d'une collision », souligne Mark Alford. « C'est de la matière qui clapote tranquillement, par opposition à de la matière en train d'être déchirée. » Ce chercheur et ses collègues ont déterminé que la version *Advanced Ligo*, actuellement en service, ne sera pas capable de détecter les ondes associées aux modes r . Mais les futures améliorations de *Ligo*, ainsi que des observatoires en projet comme le *Einstein Telescope* en discussion en Europe, en seront peut-être capables.

ET LA GRAVITATION ?

Devoiler la structure des étoiles à neutrons nous donnerait un tableau quasi complet des formes que peut prendre la matière, depuis les conditions les plus courantes jusqu'aux plus extrêmes. Et comprendre les étoiles à neutrons aurait un bénéfice supplémentaire : étudier ces astres permet, certes, de sonder les interactions nucléaires, mais ils offrent une possibilité de mieux comprendre l'interaction énigmatique qu'est la gravitation.

BIBLIOGRAPHIE

J. P. Abbott et al., **GW170817 : measurements of neutron star radii and equation of state**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 121, article 161101. 2018.

J. Novak et M. Oertel, **Les étoiles à neutrons : les sondes cosmiques**, *Dossier Pour la Science*, n° 83. avril 2014.

J. Page et al., **Rapid cooling of the neutron star in Cassiopeia A triggered by neutron superfluidity in dense matter**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 106, article 081101, 2011.

J. Novak, **Les étoiles à neutrons**, *Pour la Science*, n° 311. septembre 2003.

Les étoiles à neutrons ne sont pas le seul moyen employé pour étudier les interactions nucléaires. Dans le monde entier, des expériences sont en cours dans les accélérateurs de particules, qui opèrent tels des microscopes pour analyser l'intérieur du noyau atomique. « Les étoiles à neutrons sont un mélange de physique gravitationnelle et de physique nucléaire », souligne Or Hen, physicien à l'Institut de technologie du Massachusetts. « Pour le moment, nous utilisons les étoiles à neutrons comme un laboratoire pour comprendre la physique nucléaire. Mais comme nous avons accès à des noyaux ici sur Terre, nous devrions à terme parvenir à circonscrire assez bien l'aspect nucléaire du problème. Alors nous pourrions utiliser les étoiles à neutrons pour comprendre la gravitation, qui est l'un des plus grands défis de la physique. »

La gravitation telle que nous la comprenons actuellement (grâce à la théorie de la relativité générale d'Einstein) ne fait pas bon ménage avec la théorie de la physique quantique. À terme, il faudra repenser l'une ou l'autre, voire les deux théories, mais personne ne sait quelle piste est la bonne malgré de nombreuses tentatives. « Mais nous finirons bien par y arriver », conclut Or Hen, et c'est une perspective absolument passionnante. » ■

Il y a 50 ans, on a marché sur la Lune !

cycle de conférences

— les mercredis à 19h



Quel est l'héritage du programme Apollo ? Retournerons-nous sur la Lune dans un proche avenir ?

Accès gratuit dans la limite des places disponibles

5 mai

La conquête lunaire :

comment a-t-elle commencé ?

Jean-Pierre Martin, physicien, SAF.

22 mai

Saturn V, la « machine lunaire »

Rémi Tropé, médiateur scientifique au planétarium du Palais de la découverte.

29 mai

Formation de la Lune :

ce que nous ont appris les vols Apollo

Charles Frankel, spécialiste de la géologie des planètes

5 juin

Les exploits des missions Apollo :

2 hommes sur la Lune !

Philippe Henarejos, journaliste scientifique.

2 juin

Et si on y retournait ?

Philippe Coué, ingénieur, *International Astronautics Association* (IAA) ; Bernard Foing, astrophysicien spatial, ESA ; Claudie Haigneré, astronaute, ESA ; Jean-Philippe Uzan, astrophysicien, IAP.

Palais de la découverte

Avenue Franklin Delano Roosevelt - 75008 Paris

8 Champs-Élysées Clemenceau ou Franklin-Roosevelt

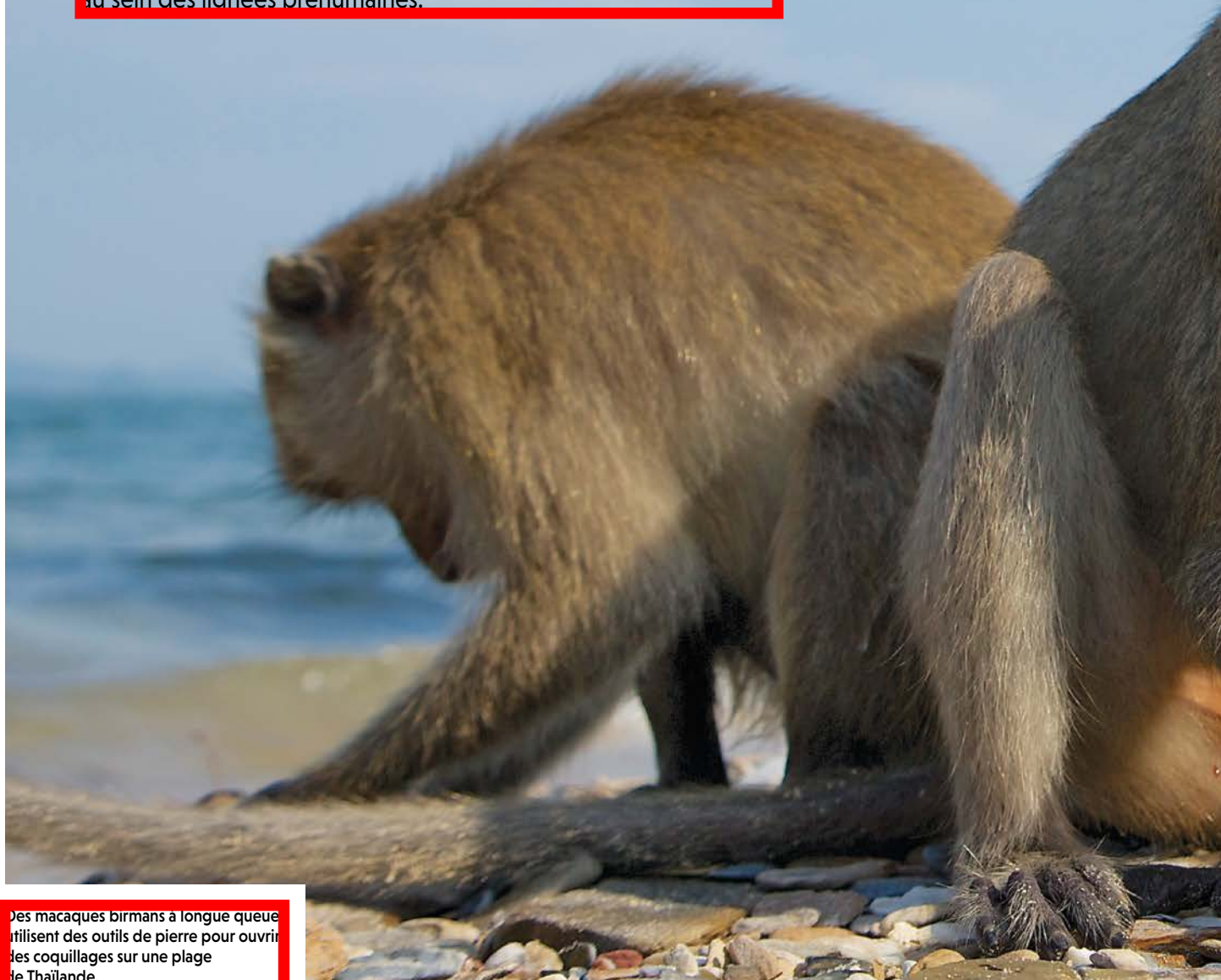
Informations sur palais-decououverte.fr



Ciel & Espace L'ASTRONOMIE SCIENCE

L'archéologue, le singe et l'outil

Plusieurs espèces de singes se servent de pierres pour accéder à certains aliments. Grâce aux traces qu'ils portent, de tels outils peuvent se révéler dans des fouilles archéologiques... et donner un éclairage nouveau sur l'apparition de la technique au sein des lignées préhumaines.



Des macaques birmans à longue queue utilisent des outils de pierre pour ouvrir les coquillages sur une plage de Thaïlande.

LES ARCHÉOLOGUES

Les archéologues n'étudient traditionnellement que les traces matérielles dues ou associées à des humains.

Certaines espèces de singes produisent et utilisent diverses sortes d'outils. C'est pourquoi les chercheurs commencent à fouiller à la recherche d'anciens outils employés par ces animaux.

Ces travaux aideront à élucider les origines de l'utilisation d'outils au sein du rameau humain et chez l'autres animaux.

LE RECHERCHEUR



MICHAEL HASLAM
Chercheur indépendant basé à Londres, auteur de travaux portant sur l'évolution de la technologie chez les humains et les autres espèces.



PHOTO: J. HASLAM / THE NEW YORK TIMES

La marée monte vite en cette agréable journée du mois de décembre 2013, mais les

macaques ne s'en soucient guère. Ils se prélassent sur les rochers et dans la mangrove qui bordent le littoral, se font toiletter, se cha-

maillent ou dégustent tranquillement une noix. Les jeunes sautent depuis des branches dans la mer chaude et limpide. Comme tous les habitants de cette région côtière et rurale de la Thaïlande, ces singes vivent au rythme des marées. Pour ma part, je suis plutôt préoccupé par la montée des eaux. Accroupi au bord du carré bien net que j'ai creusé dans la plage, je déblaise le fond à la truelle. Mon trou ne mesure qu'un demi-mètre de côté, mais, depuis que la dernière marée a libéré ce coin de plage, j'ai mis des heures à le creuser. Et hors de question de se presser: tout faux mouvement pourrait faire s'écrouler les parois.

Je conduis un chantier archéologique avec des seaux, tamis, ficelles, niveaux, sacs collecteurs et autres rubans à mesurer, qui ressemble à ce que vous pouvez imaginer. Pour autant, les artefacts anciens qui m'ont amené à fouiller dans le parc national thaïlandais de Laem Son, sur la petite île de Piak Nam Yai, ont quelque chose d'atypique: je ne suis en effet à la recherche ni de monnaies anciennes, ni de poteries, ni d'aucun vestige d'un passé humain disparu, mais de traces anciennes de la culture simiesque encore vivante chez les macaques qui occupent toujours cette même plage.

UNE ARCHEOLOGIE DES PRIMATES NON HUMAINS

Je suis, du moins de façon itinérante, un archéologue des primates: j'utilise les méthodes habituelles de l'archéologie pour essayer de comprendre comment diverses espèces de primates se sont comportées dans le passé. Quand je me sers de cette phrase pour expliquer ce que je fais, l'image qui se présente à mon esprit est celle du docteur Cornelius, ce chimpanzé qui, dans le film *La Planète des singes* de 1968, met au jour des preuves que les humains n'ont pas toujours été des bêtes. On lui reproche l'hérésie de ses recherches, et, même si cela n'est pas dit dans le film, je soupçonne fortement qu'on lui a aussi retiré tous ses financements... Je me sens proche de Cornelius, parce que mes collègues et moi essayons depuis peu d'établir un nouveau champ de recherche, qui reflète directement le sien!

Pendant plus de cent cinquante ans, le terme d'archéologie a en effet désigné l'étude scientifique des vestiges matériels du seul passé humain. Pendant ce siècle et demi, une multitude de sous-domaines de l'archéologie axés sur des époques, des lieux ou des méthodes différents sont apparus, mais ils ont

tous en commun le même thème central : comprendre les humains. Les animaux ont aussi été étudiés par l'archéologie, mais seulement sous l'angle de leur utilité pour les humains en tant que source de nourriture, moyen de transport, compagnons ou parasites : ils faisaient partie du monde humain.

Il est clair que l'approche classique a produit des résultats extraordinaires. Par exemple, en 2015, l'équipe de Sonia Harmand, du CNRS et de l'université Stony-Brook, a repoussé à plus de 3 millions d'années le plus ancien témoignage de comportement de type humain : sur le site de Lomekwi, au Kenya, elle a mis au jour des outils taillés abandonnés par l'un de nos ancêtres dans un environnement lacustre. Le fait que ces artefacts soient en pierre n'a rien d'anodin, puisque pendant presque toute la préhistoire humaine, les outils de pierre ont été les seuls vestiges matériels à traverser le temps, tandis que tous les objets en matière périssable disparaissaient.

S'intéresser au passé de nos plus proches parents, les singes, a l'intérêt de placer la longue histoire évolutive des techniques dans un contexte plus riche. Les humains et les préhumains sont évidemment des primates eux aussi, de sorte que mettre mieux en lumière notre trajectoire évolutive reste l'un des objectifs centraux de notre recherche. Replacer l'essor étonnamment complexe de la technologie dans un contexte biologique large devrait nous aider à mieux distinguer les traits provenant de notre héritage primate de ceux qui sont proprement humains.

Si les archéologues se sont traditionnellement exclusivement concentrés sur la culture matérielle humaine, c'est en grande partie parce que l'on pensait que l'outil était propre aux humains. La primatologue britannique Jane Goodall fut la première à montrer le contraire au cours de ses études de terrain sur les chimpanzés dans les années 1960.

Le préhistorien kényan Louis Leakey avait découvert divers fossiles humains et outils de pierre en Afrique de l'Est et il souhaitait comprendre à quelles activités se livraient ces ancêtres. Il recruta Jane Goodall et l'envoya observer le comportement des chimpanzés dans ce qui est devenu le Parc national de Gombe Stream, sur la rive orientale du lac Tanganyika, en Tanzanie. Même si ses découvertes eurent *in fine* peu à voir avec l'environnement du lac, ses observations de chimpanzés fabriquant des outils puis s'en servant pour obtenir de la nourriture ont changé à jamais notre perception de ce dont sont capables les autres primates. Toutefois, les chimpanzés observés par Jane Goodall à Gombe Stream (*Pan troglodytes schweinfurthii*) n'utilisent que des outils fabriqués à partir de végétaux – qui ne se conservent donc que quelques semaines



Un sapajou à barbe sauvage du Brésil se sert d'une pierre pour ouvrir une noix de cajou (ci-dessus). Des pierres portant les mêmes marques caractéristiques que celles trouvées sur les outils des sapajous actuels ont été mises au jour dans des strates datant d'il y a 2400 à 3000 ans (ci-contre).

sous le climat tropical. Entre les outils lithiques mis au jour par Louis Leakey après des millions d'années et les bâtons et autres brindilles utilisés par les chimpanzés de Gombe Stream, il y avait ainsi une très grande différence sur le plan de la durée de conservation.

CERTAINS CHIMPANZÉS SE SERVENT DE PIERRES

Par chance, les chimpanzés sont du genre inventif et, dans les années 1970, des chercheurs découvrirent que plusieurs groupes de la sous-espèce occidentale (*Pan troglodytes verus*) cassaient les noix trouvées dans la forêt à l'aide de pierres. Des arguments génétiques suggèrent que cette sous-espèce se serait séparée de la population principale des chimpanzés d'Afrique centrale il y a un demi-million d'années environ. Comme les chimpanzés d'Afrique centrale ou orientale (tels ceux de Gombe Stream) ou les bonobos (*Pan paniscus*, eux aussi en Afrique centrale) n'emploient pas d'outils lithiques, il est probable que les chimpanzés d'Afrique de l'Ouest se soient mis à

utiliser des outils après leur séparation d'avec les autres populations.

Cette découverte interroge sur l'origine des outils de pierre. Notre ancêtre commun utilisait probablement des outils fabriqués à partir de végétaux, tout comme le font toujours les chimpanzés, les bonobos, les orangs-outans et les gorilles. Pourquoi certaines rares lignées de primates ont-elles exploité la pierre comme matière première et d'autres pas? Soulignons par ailleurs que les chimpanzés sauvages n'ont qu'un nombre limité d'usages, puisqu'ils exploitent les avantages mécaniques qu'offre ce matériau dur avant tout pour ouvrir des noix. Les humains, eux, se sont servi de la roche pour créer toutes sortes d'objets, depuis des pointes de projectile aux bijoux en passant par les pyramides d'Égypte ou d'Amérique centrale. Pourquoi les trajectoires technologiques des chimpanzés et des humains sont-elles si différentes?

Il est difficile de restituer l'émergence de la technique à partir de seulement deux exemples de technologies primates fondées sur la pierre – celle des humains et celle des chimpanzés. Nous ne pouvons en effet plaquer sur les comportements de nos ancêtres celui d'un seul sous-groupe de chimpanzés actuels en avançant que la technique serait née des efforts de primates ancestraux pour manger des noix... Cela n'aurait pas plus de sens que prendre le comportement d'un seul sous-groupe d'humains modernes et de le calquer sur celui des chimpanzés.

L'un de nos principaux problèmes est que nous n'avons pratiquement aucune trace de l'évolution des chimpanzés. Les données

Nos connaissances sur nos cousins simiesques les plus proches sont par conséquent figées dans une sorte de présent éternel, et notre vision des chimpanzés découle presque entièrement des dernières décennies. Si nous n'évaluons les humains qu'à partir de cette même très courte période, nous n'aurions qu'une compréhension très pauvre de la façon dont nos techniques sont apparues et ont changé au cours de notre évolution. Pouvons-nous considérer en effet que les baguettes ou les couverts représentent au mieux les outils ancestraux qui ont aidé hommes et femmes à se nourrir? La PlayStation ou la Xbox sont-elles proches des formes les plus primitives de jouet humain? Ces questions peuvent sembler absurdes, mais les chercheurs oublient souvent de se demander si les chimpanzés du passé se comportaient comme ceux d'aujourd'hui. Étaient-ils techniquement moins compétents ou plus?

DU CASSAGE DE NOIX À LA PRODUCTION D'ÉCLATS

Un autre souci d'importance est le fait qu'une comparaison des deux espèces offre peu d'indices sur les raisons pour lesquelles certains traits sont apparus dans une lignée et pas dans l'autre. Dès les années 1860, le naturaliste anglais John Lubbock (l'inventeur des termes «Paléolithique» et «Néolithique») suggérait que le désir de casser des noix pourrait être à l'origine du comportement humain consistant à frapper des pierres les unes contre les autres pour créer des éclats coupants. Si c'est le cas, alors pourquoi les chimpanzés actuels ne fabriquent-ils pas eux aussi des éclats? L'absence de ce comportement provient-elle d'un manque d'imagination, de temps ou d'occasions?

Pour tester des hypothèses relatives aux débuts de la technique, il nous faudrait disposer d'études de cas beaucoup plus nombreuses que celles dont nous disposons. C'est sur ce point que les singes que j'ai étudiés viennent à notre rescousse.

Revenons sur la plage thaïlandaise, où a commencé ce récit. Mon trou se remplit d'eau désormais. Elle s'infiltre par les côtés et déstabilise les parois. J'utilise bien une pompe alimentée par une batterie de voiture pour l'évacuer, mais je suis quand même en train de perdre la bataille. Au moment où des vagues me lèchent déjà les orteils, je parviens enfin à sortir précautionneusement du trou une série de petites pierres volcaniques marquées de stigmates sur leurs surfaces.

Grâce aux observations de la dernière décennie des primatologues Suchinda Malaivijitnond, de l'université Chulalongkorn, en Thaïlande, et Michael Gumert, de l'université technologique de Nanvang, à Singapour,

Nous n'avons pratiquement aucune trace de l'évolution des chimpanzés

généétiques de plus en plus nombreuses indiquent que la lignée humaine a divergé de celle des chimpanzés il y a environ 7 millions d'années. Les seuls fossiles connus de chimpanzés consistent toutefois en trois dents vieilles d'un demi-million d'années. Et les plus anciens outils de chimpanzés mis au jour ont un peu plus de 4000 ans.

Nous savons aujourd'hui que, du nord de la Thaïlande à la Birmanie, les macaques birmans à longue queue (*Macaca fascicularis aurea*) des îles de la côte de la mer d'Andaman (dont Piak Nam Yai) se servent d'outils de pierre. S'agissant des macaques birmans, le capitaine de la marine anglaise Alfred Carpenter avait déjà décrit le phénomène dans les années 1880. Son témoignage était toutefois passé largement inaperçu, et c'est seulement lors d'une enquête de 2005 visant à évaluer les effets dévastateurs du tsunami de 2004 que l'on a redécouvert leur utilisation d'outils lithiques.

Le fait que les observations du XIX^e siècle et celles du XXI^e soient très similaires démontre que ce comportement est bien établi chez les singes. À marée basse, les singes sortent des forêts de leur île pour venir choisir sur le rivage des pierres grosses comme la main. Ils s'en servent ensuite pour briser les coquillages collés aux rochers émergeant à marée basse. Cinq à six coups leur suffisent en général pour ouvrir une coque. Quand ils le peuvent, ils gardent le même outil à la main. Mon équipe a ainsi pu observer certains singes ouvrir et déguster plus d'une soixantaine de coquillages d'affilée à l'aide d'un même marteau de pierre.

Les coquillages ne sont pas les seuls aliments marins que se procurent à l'aide d'outils ces macaques. Dans la zone intertidale si riche en vie, les macaques préfèrent les coques, mais ils sont aussi friands d'escargots de mer et de crabes, autant de proies pouvant prendre la fuite... Après les avoir capturées, les singes les écrasent donc sur un rocher plat, où ils les écrasent en se servant d'une pierre beaucoup plus grosse que celles utilisées pour les coques. Chaque fois qu'un groupe de macaques festoie ainsi, l'air résonne des coups portés sur ces enclumes naturelles.

DES TRACES D'USAGE SUR LES PIERRES EXHUMÉES

Le résultat de ces raids de macaques est un rivage jonché de coquilles brisées et de cailloux marqués. Les singes sélectionnent leurs outils avec compétence et persévérance : ils utilisent les extrémités pointues de petites pierres pour ouvrir les coques et les parties centrales convexes de grosses pierres pour broyer les coquilles d'escargots. Ces deux comportements endommagent les pierres de façons différentes. Mes collègues et moi avons ainsi montré que l'on pouvait déterminer l'usage de l'outil (et donc la proie potentielle visée) à partir de son type d'usure.

Ce sont ces traces caractéristiques d'usure que je cherchais en récoltant des pierres enfouies en profondeur sous le sable de la plage. Les marques de percussion que portaient les petites pierres volcaniques que j'ai mises au jour indiquent une activité d'ouverture de

UN DÉBITAGE D'ÉCLATS NON INTENTIONNEL



En 2016, Tomos Profit, de l'université d'Oxford, et ses collègues ont observé les sapaïous à barbe (*Sapajus*

libidinosus) en train de marteler ensemble un galet de quartzite avec un autre. Plusieurs modifications des pierres en résultent, dont des détachements d'éclats aux arêtes vives. Pour l'équipe de Tomos Profit, on pourrait confondre les petits amas de morceaux de pierre cassée et écaillées créées par l'activité des capucins avec les assemblages lithiques laissés par les hominiens anciens.

Dans un commentaire publié dans la revue *Nature* sur la découverte de Tomos Profit et ses collègues, Hélène Roche, chercheuse émérite au CNRS et spécialiste des premières industries humaines, a souligné que la différence entre le cas des sapaïous et celui des humains tient à l'intention du geste de taille. Le but dans lequel les sapaïous martèlent des pierres avec d'autres est inconnu. La seule action liée à cette activité est un léchage systématique de la pierre pilée, que l'on comprend mal : goût agréable, intérêt nutritif ?

En revanche, l'intention de produire des éclats tranchants pour couper de la chair est attestée en Éthiopie dès 2,5 millions d'années sur le site de Bouri et à Dikika vers 3,3 millions d'années, ce qui est justement l'âge de l'industrie lithique à gros éclats tranchants découverte par l'équipe de Sonia Harmand à Lomekwi, au Kenya (ci-contre un éclat et un nucléus trouvés sur le site). Dans le cas des premiers tailleurs humains ou préhumains, l'intention de débiter les couteaux semble claire.

FRANÇOIS SAVATIER, *Pour la Science*

coquillages. Ma découverte n'a guère fait reculer l'ancienneté connue de l'utilisation d'outils lithiques par les macaques – les plus anciens ont été enfouis il y a quelque 65 ans –, mais il s'agit en tout cas des premiers outils d'animaux jamais mis au jour par des fouilles archéologiques.

Les macaques thaïlandais ne sont pas les seuls singes laissant des traces archéologiques de leurs activités. Vers la fin de 2014, je me retrouve à nouveau assis à côté d'un trou carré, mais cette fois dans le parc national de la Serra da Capivara, dans le nord-est du Brésil. Hélas, aucune brise marine ne vient atténuer la chaleur écrasante dans les broussailles qui couvrent les hauts plateaux de grès du parc. Une équipe d'étudiants de l'université d'État du Piauí, à São Raimundo Nonato, est en train de creuser le sol, tandis que Tiago Falótico et Lydia Luncz, primatologues postdoctorants de l'époque, enregistrent les trouvailles.

Nous sommes ici parce que les sapaïous à barbe (*Sapajus libidinosus*) du parc se sont révélés des maîtres en technique. En 2004, Dorothy Frigaszy, de l'université de Géorgie, aux États-Unis, et Elisabetta Visalberghi, de l'Institut italien des sciences et technologies de la cognition, ont signalé que des sapaïous

vivant à quelque 300 kilomètres de l'endroit où nous sommes se servent d'outils de pierre. Aujourd'hui, nous savons que les sapajous de nombreux endroits du Brésil cassent les coques très dures des noix et autres fruits locaux à l'aide de grosses pierres en s'y prenant d'une façon qui ressemble beaucoup à ce que font les chimpanzés d'Afrique de l'Ouest.

Les sapajous du parc national de la Serra da Capivara sont toutefois particulièrement créatifs. En plus de casser des noix et des fruits, ils utilisent des fragments de roche pour creuser le sol à la recherche d'araignées, d'insectes et de racines. Autre parallèle avec leurs cousins chez les grands singes, ils sélectionnent et cassent des brindilles, ajustent leur longueur et les débarrassent de leurs feuilles avec les dents, instruments qui leur permettent de débusquer des proies telles que les lézards cachés dans une crevasse.

Une source de nourriture particulière a retenu toute notre attention lors des fouilles : les anacardiens, ou pommiers-cajou. Ces arbres, qui fournissent les noix de cajou, poussent naturellement dans cette région du Brésil. Leurs fruits sont nutritifs et savoureux, mais le liquide corrosif qu'ils contiennent brûle la peau. C'est pourquoi les sapajous cassent les noix à l'aide de lourdes pierres. Leur tactique est efficace et laisse des traces de ce liquide foncé sur les outils.

En examinant et en recensant les pierres utilisées par les sapajous et qui se sont accumulées au fil des années, nous avons pu déterminer quels coins de forêt les singes exploitaient

cette hypothèse. Nous avons déterminé au moins quatre phases distinctes d'utilisation ancienne d'outils par les singes, illustrées par la découverte dans les sédiments de séries de pierres ayant servi de marteaux et d'enclumes et endommagées par l'usage qui en avait été fait. Notre conviction qu'il s'agit là d'outils utilisés par les sapajous est renforcée par l'absence de traces d'activité humaine dans les parages (traces de foyers, de fragments de poterie ou d'outils lithiques que les chasseurs-cueilleurs amérindiens fabriquaient).

La strate la plus ancienne contenant des outils de sapajous date de 2400 à 3000 ans. On identifie donc là des artefacts non humains les plus anciens jamais trouvés hors d'Afrique. Ils témoignent d'un aspect de la vie simiesque en Amérique du Sud qui date de bien avant l'arrivée des Européens. Lors de nos fouilles, nous n'avons trouvé aucun indice d'utilisation d'outils fabriqués à partir de végétaux. Mais, comme dans le cas des humains et des grands singes, cette absence reflète avant tout le caractère périssable de la matière organique.

La découverte d'outils ayant appartenu à une autre espèce de singes constitue déjà une récompense suffisante à nos efforts. Les sapajous du parc national de la Serra da Capivara nous réservaient toutefois une surprise. Au cours de la même campagne de fouilles, j'ai filmé les singes en train de choquer des pierres sur d'autres qui faisaient partie d'un gros conglomérat rocheux. Il semble qu'ils essayaient de produire de la poudre de quartz, qu'ils léchaient ou reniflaient ensuite. Des confrères avaient déjà signalé ce curieux comportement.

Mais en collectant les débris et en fouillant autour du conglomérat rocheux, j'ai remarqué quelque chose d'intéressant : les éclats produits par les sapajous ressemblaient indéniablement aux éclats que l'on trouve sur certains sites d'activités humaines préhistoriques. L'analyse détaillée des pierres réalisée par Tomos Proffitt, de l'université d'Oxford, un autre des postdoctorants de l'équipe, a montré que nous avions là le premier cas de primates non humains cassant délibérément des pierres et produisant des éclats à arêtes vives.

Soyons clairs : pour l'instant, nul n'a observé de sapajous faisant usage des éclats tranchants qu'ils créent. Ce comportement reste pour le moment exclusivement humain. Néanmoins, cette production non intentionnelle d'éclats, qui résulte semble-t-il de la fabrication par les singes d'une poudre minérale qu'ils ingèrent – une activité que l'on n'avait pas imaginée – soulève des doutes quant à l'interprétation des données concernant les premiers humains. Les préhistoriens ont en effet supposé que les premiers humains brisaient des galets afin d'en tirer des éclats

La strate la plus ancienne contenant des outils de sapajous date de 2400 à 3000 ans

le plus intensément. L'état du sol ainsi que les conditions d'humidité et d'ombrage propices à la croissance des anacardiens n'ayant pas notablement changé au cours des derniers millénaires, nous avons supposé que les sites qui sont aujourd'hui le siège d'une activité intense sont probablement aussi ceux que les sapajous ont exploités le plus dans le passé.

Les fouilles que nous avons effectuées sur un certain nombre de ces sites ont confirmé

tranchants, pour, par exemple, découper de la viande (voir l'encadré page 52). Compte tenu de ce que nous observons chez les sapajous, il faut se demander si nos ancêtres d'il y a 3 millions d'années s'intéressaient ou non aux éclats qu'ils produisaient.

En d'autres termes, nos ancêtres ont-ils longtemps produit accidentellement des éclats avant d'avoir un jour l'idée de s'en servir comme couteaux? Nous n'en savons rien, mais il faut désormais prendre en compte cette possibilité. Si les préhumains aussi fabriquaient fortuitement des éclats tranchants, cela n'a pu qu'ouvrir la voie à l'innovation consistant à utiliser de tels éclats comme outils de découpe.

Quelles que soient les leçons que nous pourrions en tirer sur l'évolution technologique des humains, les découvertes de Thaïlande, du Brésil et d'Afrique fournissent des données archéologiques sur les techniques développées au sein de trois lignées de primates non humains. Un petit bilan s'impose: il y a dix ans à peine, nous apprenions que d'autres primates que les grands singes anthropoïdes utilisent des outils lithiques; nous avons maintenant franchi les premières étapes permettant de retracer l'existence d'un tel comportement dans des temps anciens. Même s'il est de loin le plus riche, le registre archéologique humain ne représente aujourd'hui qu'un quart des cas rapportés chez les primates.

Dans un article récent, mes collègues et moi suggérons que nous sommes parvenus au terme de l'archéologie anthropocentrique; les archéologues devront désormais considérer tous les comportements ayant existé dans le passé. Certains chercheurs désapprouvent peut-être mon idée que l'archéologie est une méthode applicable à toute lignée animale produisant un enregistrement matériel et durable de ses comportements. Mais les travaux de la petite communauté des archéologues des primates ont montré qu'ils aident à mettre en perspective à la fois notre évolution et celle d'autres espèces. Il est clair que la technologie – la savante intégration de la culture matérielle dans nos vies – n'est pas une spécificité humaine. Pour évoluer, elle n'a besoin ni de langage, ni d'enseignement et de coopération de type humain, ni même d'un gros cerveau: la taille de celui des sapajous et des macaques adultes n'atteint en effet qu'environ 5% de la taille du nôtre.

L'emploi d'outils de pierre est apparu indépendamment au moins quatre fois dans l'histoire évolutive récente des primates: dans les environnements côtiers (macaques), aquatiques (humains), boisés (chimpanzé) et semi-arides (sapajous). Nous pouvons déduire de cette diversité que le même comportement est apparu à plusieurs reprises dans le passé au sein de nombreuses espèces



de primates, même si elles ne le pratiquent plus ou si elles ont disparu. Et si c'est bien le cas, alors leurs outils de pierre sont toujours quelque part, en attente d'être découverts...

Cette loutre de mer fait la planche afin de stabiliser sur son ventre une pierre, sur laquelle elle va frapper une huître pour l'ouvrir.

AU-DELA DES PRIMATES: OUTRES DE MER, CORBEAUX...

En outre, il n'y a pas de raison de nous arrêter aux primates. Avec l'éthologue Natalie Jomini, de l'institut Max-Planck d'histoire humaine, à Iéna, en Allemagne, et des chercheurs de l'aquarium de la baie de Monterey et de l'université de Californie à Santa Cruz, j'ai entamé il y a quelques années des recherches archéologiques sur l'utilisation d'outils de pierre par les loutres de mer de la côte ouest des États-Unis.

Nous avons notamment montré que les loutres de mer retournent régulièrement en des lieux privilégiés situés le long du littoral afin d'y casser et d'y ouvrir des coquillages. Elles laissent derrière elles des pierres endommagées et de grands tas de coquilles, que l'on pourrait facilement confondre avec les amas laissés par des hommes préhistoriques, voire avec des tas d'ordures. Or ces amas attirent manifestement les jeunes loutres, poussées à venir exploiter des coquillages là où ils se trouvent. Cette boucle de rétroaction pourrait être l'un des mécanismes à l'origine de l'existence d'une tradition technologique chez les loutres de mer, un peu comme la boucle de rétroaction qui pousse les sapajous barbus à casser des noix de cajou de préférence en des lieux riches en anacardiens.

Natalie Uomini et moi avons aussi effectué un travail de terrain sur les corbeaux de Nouvelle-Calédonie (*Corvus moneduloides*), dont les remarquables facultés cognitives se traduisent par une utilisation sophistiquée d'outils. Ces corbeaux aussi exploitent à répétition les mêmes lieux. Pourvu que des matériaux durables s'y trouvent, toutes les conditions nécessaires à la formation de sites archéologiques pouvant nous aider à restituer les comportements du passé sont rassemblées.

Curieusement, l'essor récent de l'archéologie des primates coïncide avec la sortie d'une série sur le thème de *La Planète des singes*. Nos cousins grands singes y développent des techniques rudimentaires qui, néanmoins, surpassent rapidement celles que l'on connaît chez les animaux sauvages dans le monde réel. Une lance composée d'une pointe fixée sur une hampe suppose par exemple un bond cognitif considérable que les grands singes d'aujourd'hui n'ont manifestement pas fait. Dans la série, le contrôle du feu et le port de bijoux comptent aussi parmi les attributs des singes...

Si, sur notre planète, de tels attributs ne se rencontrent que chez les humains.

BIBLIOGRAPHIE

M. Haslam et al., **Archaeological excavation of wild macaque stone tools**, *Journal of Human Evolution*, vol. 96, pp. 134-138. 2016.

M. Haslam et al., **Pre-Columbian monkey tools**, *Current Biology*, vol. 26(13), pp. R521-R522. 2016.

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

X. Wong, **Les premiers ailleurs de pierre n'étaient pas des humains**, *Pour la Science*, n° 478, pp. 28-38. août 2017.

représenter à l'écran des singes épris de technique n'est pas complètement farfelu. Cela paraît même crédible. Les chimpanzés occidentaux fabriquent des lances simples d'un seul tenant pour attaquer de plus petits primates, comme le font les sapajous à l'encontre des lézards. William McGrew, de l'université de St Andrews, en Écosse, l'observateur le plus averti en matière d'utilisation d'outils par les chimpanzés et l'un des premiers défenseurs de l'archéologie des primates, a déjà signalé un chimpanzé d'Afrique de l'Est portant un « collier » en peau de singe nouée. Que se passe-t-il chez les singes quand les chercheurs ne les observent pas ?

L'archéologie humaine est une source fiable de connaissances sur notre évolution et notre diversité. En récompense de l'effort de milliers de chercheurs depuis plus d'un siècle, nous disposons aujourd'hui de données s'étendant sur plus de 3 millions d'années, qui servent de base à nos scénarios évolutifs. S'agissant de l'archéologie des autres animaux, nous ne sommes en revanche qu'au tout début. Qui sait ce que nous découvrirons, si nous gardons l'esprit ouvert ? ■

LES RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

Dans le cadre de l'exposition **Océan, une plongée insolite**

CONFÉRENCES

L'Océan, protagoniste du monde de demain ?
En partenariat avec l'Université permanente de Paris

Lundi 13 mai – 14h30
Le Rôle de l'Océan dans les changements du climat passé
Bruno Turcq, spécialiste des paléoclimats tropicaux, LOCEAN

Jeudi 16 mai – 14h30
L'Océan pharmacien
Marie-Lise Bourguet-Kondracki, biologiste moléculaire, Muséum

Lundi 20 mai – 14h30
Le milieu marin profond : une exploration à peine entamée !
Sarah Samadi, responsable de l'équipe Exploration Espèces et Evolution, Muséum

Grand Amphithéâtre du Muséum
17 rue Cuvier, Paris 5^e

Dans le cadre du **Printemps du Muséum**

RENCONTRE

Lundi 13 mai 2019 – 19h
Faune, une approche naturaliste
Avec : Alice Savoie, créatrice de caractères typographiques
Introduction de : Stéphane Schmitt, historien, CNRS

TABLE-RONDE

Lundi 27 mai – 19h
Humain, nature et technologies
Animée par Marie-Odile Monchicourt, journaliste
Avec : Julian Alvarez, responsable Recherche au Play Research Lab de la Terre Numérique
Ana Cristina Torres et Minh-Xuan Truong, écologues, équipe TEEN (Transition écologique et expériences de nature), Muséum

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

Au Jardin des Plantes

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

POUR LA SCIENCE



Comment s'écoulent des grains mêlés à un fluide

Le sable mouillé ne se comporte pas comme le sable sec. Mais aller au-delà de la simple constatation s'est révélé difficile, et l'écoulement d'une suspension de grains dans un liquide obéit à des lois que les physiciens n'ont caractérisées que récemment.

L'ESSENTIEL

« Dans la nature et dans l'industrie, la matière se présente souvent sous forme granulaire et exhibe alors des comportements particuliers.

« Les chercheurs avaient relativement bien compris le comportement d'un ensemble de grains secs, qui n'interagissent pas avec le fluide dans lequel ils baignent

« Plus récemment, les physiciens ont cherché à comprendre l'influence d'un fluide, qu'il s'agisse d'un gaz comme l'air ou d'un liquide comme l'eau.

« Des expériences et simulations numériques d'écoulements de grains mouillés ont permis de généraliser les modèles utilisés pour les grains secs.

LES AUTEURS



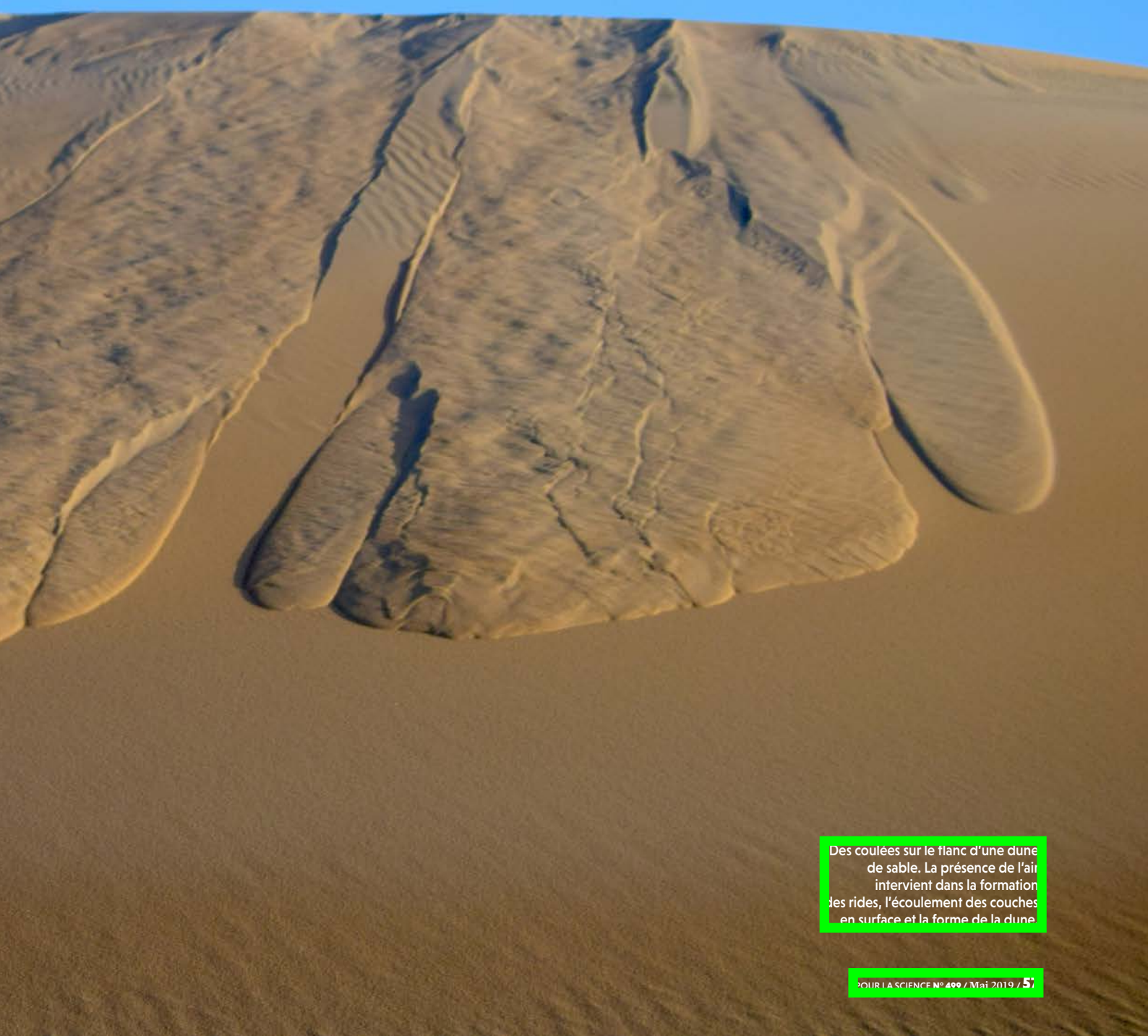
JEAN-YVES DELENNE
directeur de recherche de l'Inra au IATE, université de Montpellier



ETIENNE GUYON
physicien à l'ESPCI Paris, ancien directeur de l'École normale supérieure



FARHANG RADJAI
directeur de recherche au CNRS au LMGC, université de Montpellier



Des coulées sur le flanc d'une dune de sable. La présence de l'air intervient dans la formation des rides, l'écoulement des couches en surface et la forme de la dune.

Le 7 juin 1602, un puissant tremblement de terre frappa la ville de Port-Royal, en Jamaïque. L'une des secousses liquéfia pendant un instant le sable sur lequel les bâtiments étaient construits, et une bonne partie de la cité fut détruite et ensevelie; on a même pu identifier l'heure précise de ce phénomène soudain par une montre retrouvée noyée dans les sédiments! Dans cette zone qui est soumise à de nombreux événements sismiques, le même phénomène se reproduira deux siècles plus tard, en 1907 (voir la photographie page 62).

On comprend mieux aujourd'hui les mécanismes physiques responsables de la liquéfaction ou de la déstabilisation d'un milieu granulaire. Il s'est révélé nécessaire de tenir compte non seulement des grains de sable, des frottements entre eux ou de leurs collisions, mais aussi du fluide dans lequel ils baignent, qu'il s'agisse d'air dans le cas des dunes ou d'eau dans le cas de la ville de Port-Royal.

Une manifestation spectaculaire du rôle du fluide, déjà décrite par Marco Polo mais qui n'a été comprise que dans les années 2000, est celle des dunes chantantes: la couche de grains qui s'écoule fait vibrer l'air, ce qui produit un son grave proche d'un bourdonnement. C'est aussi le vent qui met en mouvement les grains de sable, dont résultent le déplacement des dunes et leurs formes variées, que ce soit dans les déserts ou sur d'autres planètes telles que Mars. Et cela ne concerne pas que les dunes de sable, puisqu'on a même récemment observé sur Pluton des dunes constituées de grains de méthane solide...

Les milieux granulaires, omniprésents dans la nature et dans l'industrie, se comportent de façon particulière, et les scientifiques s'y intéressent depuis longtemps. Les décennies passées ont connu, notamment en France, un effort important pour comprendre de façon unifiée les propriétés statiques et dynamiques de la matière sous forme de grains.

Pour ce faire, les chercheurs se sont appuyés sur un modèle simple, dit du sac de billes, où l'on considère des empilements de sphères non déformables et de même diamètre. On avait ainsi relativement bien décrit les propriétés des milieux granulaires secs. Mais cela n'avait pas encore été le cas pour des grains immergés dans un liquide ou interagissant avec l'air qui les entoure. Or cette situation est fréquente: transport pneumatique de la farine dans les moulins, vents de sable dans le désert, béton frais dans les coffrages, grains charriés par les cours d'eau...

Dans ce contexte, une question générale se pose aux physiciens: peut-on caractériser un écoulement de grains par un paramètre qui jouerait un rôle équivalent à la viscosité d'un

niel s'écoulant sur une surface inclinée? Si oui, peut-on exprimer ce paramètre, qui quantifie la résistance à l'écoulement, à partir des grandeurs physiques liées aux grains (leurs géométries et leurs masses) et au fluide présent entre les grains (sa densité et sa viscosité) pour prendre compte de l'effet global? Les recherches récentes ont montré que l'on peut répondre positivement à ces questions.

DES VOUTES DANS LE SABLIER

Les chercheurs ont commencé par étudier les écoulements granulaires stationnaires (on lit aussi «permanents»), c'est-à-dire les écoulements dont les caractéristiques ne varient pas au cours du temps, au moins sur une certaine durée. Le sablier en fournit un exemple.

Observons un sablier que l'on vient de retourner. Bien que l'écoulement des grains évoque celui d'un liquide, ce n'est pas le cas: en témoigne le cône de sable qui se forme dans le compartiment inférieur du sablier, au lieu de la bouche horizontale d'eau au fond d'une horloge à eau ou clepsydre.

De plus, le débit de l'eau dans une clepsydre ralentit lorsque le niveau de liquide dans le récipient supérieur diminue, alors que dans un sablier, le débit de sable reste constant jusqu'au bout. Ce paradoxe s'explique, depuis les travaux en 1958 de Pierre Dantu, ingénieur des Ponts et Chaussées, par un effet de voûte. Au cours de l'écoulement, les grains sous pression dans le compartiment du haut, en raison du poids des couches supérieures, frottent les uns contre les autres en formant un ensemble d'arches continues de grains s'étendant jusqu'aux parois latérales (voir la photographie page 60); elles se font et se défont au fur et à mesure de la vidange. C'est aussi ce qui se passe pour l'écoulement de grains dans des silos profonds et insuffisamment larges: en cas de blocage, on doit alors taper sur les parois externes pour que les grains s'écoulent! Ces voûtes supportent les grains au-dessus d'elles; par conséquent, le poids des couches supérieures ne s'exerce pas au-dessous

Parce que le sablier contient de l'air, son écoulement est en fait intermittent



TEMPS IMPARTI-ÉCLIPSES ?

Ce sablier monumental de l'artiste Jean-Bernard Métais fait s'écouler le sable par un ensemble d'ouvertures programmées. Présenté pour la première fois en 2000 au jardin des Plantes, à Paris, il est installé de façon permanente au Mans. Comme dans tout sablier, le sable s'écoule comme un liquide, mais contrairement à l'eau dans un siphon, son débit est constant. Autre différence avec un liquide : le matériau granulaire s'accumule en formant un cône.

et ne contribue pas à pousser les grains se trouvant près de l'orifice. Ainsi, globalement, la pression à ce niveau ne varie pas avec la hauteur de la colonne de sable, d'où le débit constant.

Une loi classique, dite de Hagen-Beverloo, découverte par l'Allemand Gotthilf Hagen en 1852 et précisée en 1961 par le Hollandais Wim Beverloo et ses collègues, rend compte de la façon dont le débit moyen du sablier (ou d'un silo) dépend de la taille de l'orifice reliant les deux compartiments, débit qui finit toujours par s'annuler pour des tailles d'orifice inférieures à six diamètres de grains.

En fait, ces écoulements sont irréguliers. Au-dessous d'une voûte, les grains se séparent et coulent comme un fluide, en se heurtant au cours de leur chute libre. Mais au-dessus, les grains restent bloqués tant que la voûte se maintient. L'écoulement est donc intermittent.

Une situation redoutée se produit lorsqu'une brèche s'ouvre accidentellement dans une structure où des grains sont confinés. Dans les réacteurs nucléaires, par exemple, le combustible nucléaire se présente sous la forme de grains stockés sous pression dans des gaines métalliques. Il est important d'évaluer la quantité de matière radioactive éjectée si la gaine se rompt. Des problèmes similaires se posent dans les applications où un fluide transporte des grains, comme dans un inhalateur de poudres médicamenteuses : dans ce cas, au contraire, on cherche à faciliter l'écoulement de la suspension de grains et à éviter les blocages.

Dans ces écoulements, quelle est l'influence du fluide (par exemple l'air dans le cas du sablier) où les grains sont immergés ? D'un côté, par sa viscosité, le fluide freine l'écoulement des grains. D'un autre côté, il a un effet lubrificateur qui rend plus difficile la formation d'arches. Ces dernières années, nos équipes du CNRS et de l'Inra à Montpellier ont effectué des simulations numériques afin d'évaluer ces contributions relatives. Ces études rendent compte d'expériences que l'équipe de Daniel Bideau, à l'université de Rennes, avait réalisées en 1995 pour déterminer l'effet de l'air sur l'écoulement dans le sablier.

FLUX D'AIR DANS LE SABLIER

Ces simulations et ces expériences ont montré qu'il se produit le scénario suivant. Dans le compartiment inférieur du sablier, la chute de grains augmente la pression de l'air par rapport à celle du compartiment supérieur ; cette surpression a alors pour effet de bloquer l'écoulement, jusqu'à ce que, sous l'effet du flux de l'air à travers les espaces entre grains, les deux pressions s'égalisent de nouveau. L'écoulement reprend alors, et ainsi de suite. Autrement dit, le sablier fait en quelque sorte tic-tac... comme une pendule ! La succession de phases d'écoulement est semblable aux glouglous d'une bouteille que l'on vide. La durée moyenne entre deux blocages successifs dépend de la viscosité de la suspension et de la taille de l'orifice.

Penchons-nous de plus près sur ce paramètre de viscosité. Une suspension de grains :

ans un fluide présente une viscosité effective qui est supérieure à celle du fluide pur. Pour de faibles teneurs en grains, la viscosité effective augmente proportionnellement à la concentration (une loi décrite pour la première fois par Albert Einstein lorsqu'il s'est intéressé au mouvement brownien de particules de taille microscopique). Mais pour des concentrations élevées, typiquement supérieures à 50% en volume pour des grains de même taille, les grains se gênent en se frottant et en entrant en collision, ce qui finit par les immobiliser.

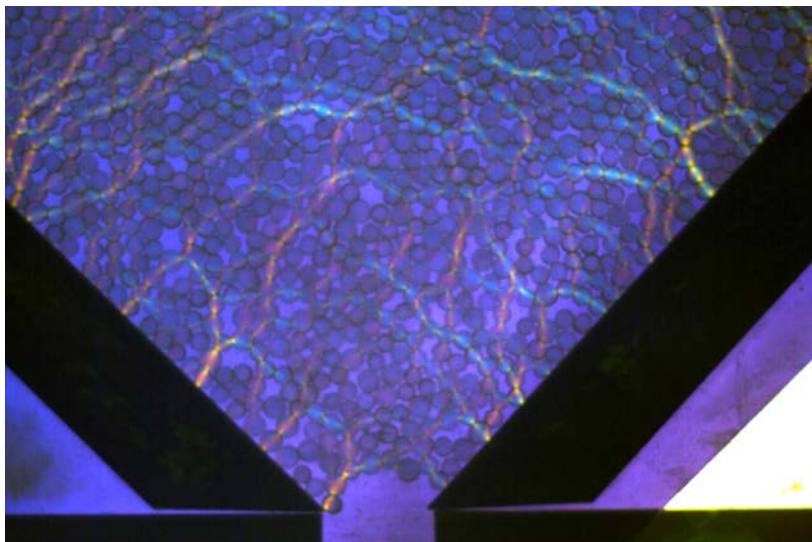
Dans l'exemple du sablier, lorsqu'une suspension très concentrée se bloque et que la vitesse de l'écoulement s'annule, tout se passe comme si la suspension était un liquide infiniment visqueux. Si, en revanche, les parois du sablier s'écartaient un peu en laissant le volume de l'ensemble s'ajuster, la compacité prendrait une valeur telle que l'écoulement se poursuivrait. D'après nos simulations, cette compacité critique est de 58% pour un fluide contenant des grains sphériques de même taille; ainsi, la viscosité de la suspension reste finie.

Il est possible de séparer les effets dus à la présence du fluide de ceux dus à l'encombrement des grains et à leurs collisions. Vers 2011, l'équipe d'Olivier Pouliquen à l'université d'Aix-Marseille a réalisé des expériences en ce sens, où l'on applique un cisaillement à une suspension granulaire (voir la figure page suivante, à gauche).

MESURER L'EFFET D'UN CISAILLEMENT

Dans ces expériences, le milieu granulaire est confiné entre deux plaques planes horizontales, dont la supérieure exerce une pression P . On applique un cisaillement à l'ensemble en faisant glisser la plaque supérieure à une certaine vitesse; le taux de cisaillement est défini par le quotient de cette vitesse par l'écart entre les plaques. De plus, on utilise une plaque supérieure poreuse, ce qui permet au liquide de la suspension de circuler librement. Ce dispositif permet d'évaluer la résistance au déplacement en fonction de la pression P exercée sur les grains; il rend compte de l'effet de viscosité d'une suspension concentrée comme on pourrait le faire pour un liquide en déplaçant deux florets mouillés l'un par rapport à l'autre.

Ces expériences ont montré que, contrairement à celle des fluides simples tels que l'eau et l'air, la viscosité effective de la suspension diminue lorsque le taux de cisaillement augmente. On constate aussi qu'elle baisse lorsque la pression de confinement diminue (voir la figure page suivante, à droite). Comme le matériau granulaire peut adapter son volume, ces effets s'expliquent par le fait que dans les deux cas (augmentation du taux de cisaillement et diminution de la pression) la concentration des grains diminue, ce qui

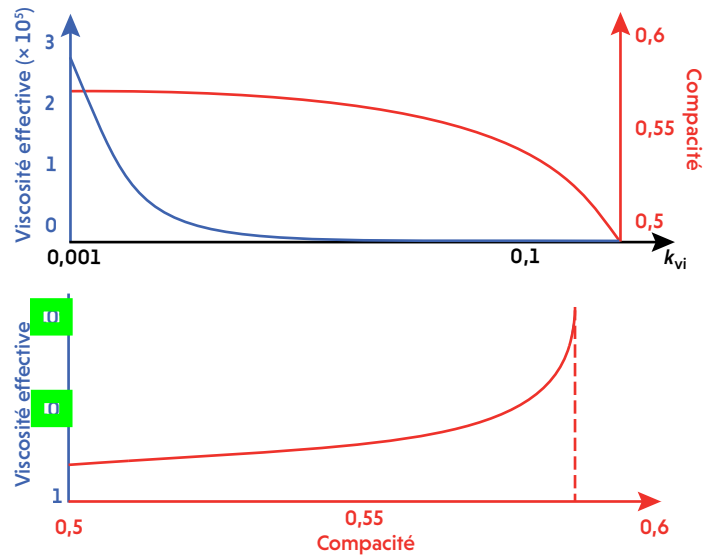
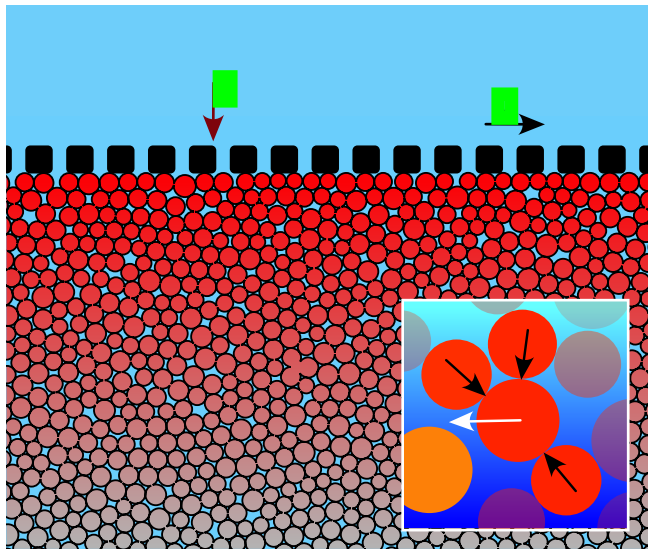


Dans ce modèle à deux dimensions d'un sablier, les grains sont remplacés par des disques photoélastiques d'axes parallèles. En lumière polarisée, ces « grains » soumis à des efforts mécaniques apparaissent en clair, ce qui permet d'identifier un réseau de voûtes. Une telle voûte, constituée par une chaîne de forces, bloque ici l'écoulement à travers l'orifice du sablier.

réduit les encombrements entre les particules. En effet, les forces de viscosité exercées sur les grains tendent à les séparer et s'opposent à la pression de confinement, qui les rapproche. Le rapport entre le produit de la viscosité du fluide par le taux de cisaillement, d'une part, et la pression, d'autre part, mesure donc leur importance relative. Lorsque ce nombre, nommé « nombre visqueux », augmente, la viscosité effective augmente, par l'effet croissant des encombrements entre grains.

Cette façon dont la viscosité d'une suspension varie en fonction du nombre visqueux permet d'expliquer l'effet de la taille des grains sur la viscosité. Dans un écoulement libre de grains sur un plan incliné, la pression sur les grains est due au poids des couches supérieures et est donnée par le rapport du poids des grains (qui est proportionnel à r^3 , où r est le rayon des grains) divisé par leur section (proportionnelle à r^2). Par conséquent, le nombre visqueux varie comme l'inverse du rayon des grains: il est d'autant plus petit que les grains sont gros. Ainsi, pour une vitesse d'écoulement donnée, plus les grains sont gros, plus la viscosité

Plus les grains sont gros, plus la viscosité effective de la suspension est faible



Le principe de l'étude expérimentale du cisaillement d'un milieu granulaire immergé dans un liquide. Le milieu est confiné entre deux plaques, la supérieure étant poreuse pour que le liquide soit libre de circuler. On déplace à une vitesse V la paroi supérieure, qui exerce une pression P sur la suspension. Ici, le niveau de couleur rouge est proportionnel à la vitesse des grains. À l'échelle microscopique (cartouche), chaque grain subit des forces de contact (flèches noires) de la part des grains qui le touchent, ainsi qu'une force résultante exercée par le fluide (flèche blanche).

Les courbes, obtenues par simulations numériques, montrent comment la viscosité effective d'une suspension de grains, rapportée à celle du fluide pur, et sa compacité varient avec le nombre visco-inertiel k_{vi} (des valeurs élevées de k_{vi} correspondent à des écoulements rapides) pour des fortes densités de grains. La viscosité effective augmente rapidement lorsque k_{vi} diminue et tend vers zéro, alors que la compacité atteint une valeur limite (58 % pour des grains sphériques de même taille). En combinant les deux effets, on voit que la viscosité effective relative à celle du fluide augmente avec la compacité.

La viscosité effective de la suspension est faible. C'est pourquoi il est plus facile de rincer un plat qui a contenu des gros grains (par exemple du riz ou des lentilles) plutôt que des petits grains (par exemple de la farine).

Des simulations numériques, réalisées il y a environ deux ans par nos équipes à Montpellier en collaboration avec l'IRSN (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire), montrent que lorsque la vitesse d'écoulement de la suspension est suffisamment élevée, sa viscosité effective ne dépend plus uniquement du nombre visqueux. L'agitation accrue des grains conduit à une augmentation du nombre de collisions, donc à une diminution de la compacité. Dans le même temps, la viscosité effective de la suspension diminue.

L'effet des collisions des grains sur une surface se traduit par une pression (dont on montre qu'elle est proportionnelle au rapport entre l'énergie cinétique des grains et leur volume). Ce phénomène est assez comparable à l'effet des molécules dans un gaz dont les chocs erratiques, dus à l'agitation thermique, sont à l'origine de la pression. Mais dans le cas des grains, pour lesquels ce mouvement spontané est négligeable, c'est l'écoulement des grains qui est à l'origine des collisions et, partant, de l'effet de pression.

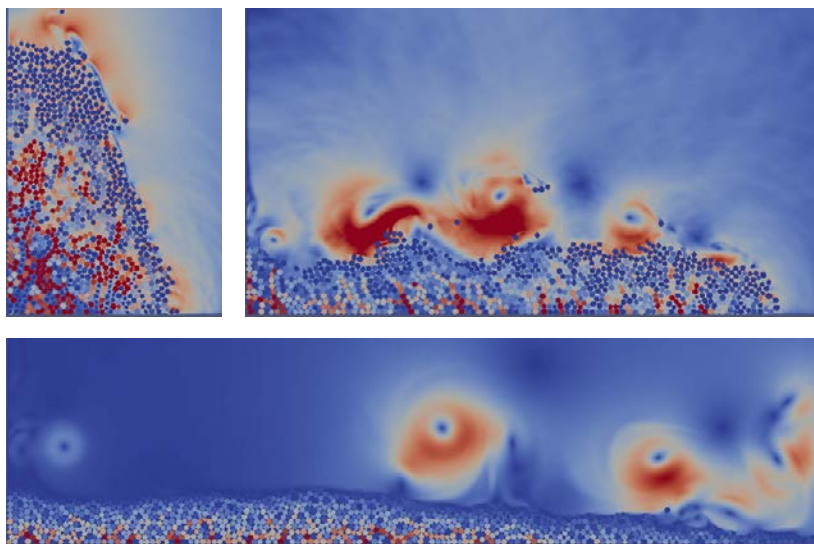
On peut décrire les écoulements rapides de grains secs à l'aide d'une autre quantité sans dimension, le « nombre inertiel », introduit en 2004 dans un article publié par GdR

MiDi, un groupement de recherche du CNRS sur les « milieux divisés ». Traduisant le rapport entre la pression due aux collisions des grains et la pression de confinement, ce nombre est petit lorsque cette pression est élevée et grand pour des écoulements rapides. Il caractérise l'écoulement dans des situations expérimentales variées.

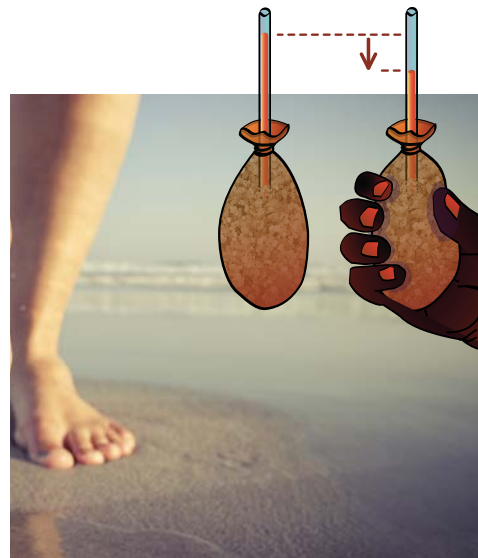
Et dans le cas où les grains ne sont pas secs, mais baignent dans un liquide ? Nos simulations numériques, qui combinent la dynamique des fluides avec celle des grains, ont montré que les paramètres mesurables de la suspension (concentration en grains et viscosité effective) dépendent d'un seul nombre rassemblant les effets de la viscosité et ceux des collisions : le « nombre visco-inertiel », que l'on notera ici k_{vi} et qui remplace à la fois le nombre visqueux et le nombre inertiel (voir les graphiques ci-dessus).

Cette loi des suspensions rend compte, dans un cadre unifié, des effets de la vitesse d'écoulement des grains, de la viscosité du fluide et de la pression de confinement. Elle s'applique à de nombreuses situations concrètes d'écoulements des grains en présence d'un fluide, et ce même lorsque ces écoulements ne sont pas permanents.

Jusqu'ici, nous avons fait comme si les écoulements de grains étaient permanents. C'est insuffisant car, par exemple, il est essentiel de pouvoir anticiper le déclenchement d'un glissement de terrain sur un sol incliné après de fortes pluies.



Ces images d'une simulation numérique réalisée en 2012 par des chercheurs de l'université de Montpellier montrent trois instants d'une avalanche de grains sous l'eau. Dans le fluide, la vitesse est croissante du bleu au rouge; la pression subie par les grains est également représentée du bleu au rouge. On voit notamment qu'en raison de la présence du liquide, le talus s'étale sur de longues distances.



Le sable mouille et tasse gonfle et s'assèche dès que l'on marche dessus: c'est le phénomène de dilatance, que l'on peut mettre en évidence en remplissant de sable et d'eau un ballon de baudruche surmonté d'un tube de verre. Si le sable est bien tassé initialement, une pression sur le ballon provoque un desserrement de la structure des grains: le l'eau s'engouffre dans le ballon et le niveau d'eau baisse, contrairement à ce que l'on attendrait *a priori*.

Une expérience à la portée de chacun illustre le caractère transitoire du comportement d'un milieu granulaire imbibé d'eau. En marchant à marée basse sur une plage, vous pouvez mettre en évidence le rôle de l'eau présente dans le sable, que le va-et-vient des vagues et des pas ait tassé. Lorsque vous posez un pied sur ce sable humide, il se forme dans un premier temps une zone sèche autour, tandis que le dessous de votre pied se mouille (*voir la photographie ci-dessus, à droite*).

QUAND LA PRESSION DU PIED DILATE LE SABLE

C'est peut-être une telle observation qui a conduit en 1885 le scientifique irlandais Osborne Reynolds au concept de «dilatance», qu'une expérience simple permet de comprendre (*voir le dessin ci-dessus, à droite*). Remplissez un ballon gonflable de sable mouillé sans le tasser; attachez-y rigidement un tube de verre verticalement pour avoir un niveau de l'eau en excès. Pressez le ballon: le sable se tasse et de l'eau est poussée dans le tube, dont le niveau d'eau s'élève.

Si, au contraire, vous avez initialement bien tassé le sable mouillé, le niveau d'eau commence par baisser lorsque vous pressez le ballon. Pourquoi? Le sable ayant été tassé, sa compacité avait atteint sa valeur maximale; la déformation du sable n'a donc pu que réduire sa compacité, et l'eau est venue remplir les volumes libres qui se sont ainsi créés.

Cet effet de dilatance peut conduire à des phénomènes d'écoulement transitoire dans lesquels le matériau granulaire change de viscosité. C'est ce qui s'est produit en 1692 pour

le sable sur lequel la ville de Port-Royal était construite et qui a conduit à une catastrophe.

Un tel phénomène de liquéfaction se manifeste lors du passage d'une onde sismique à travers des sols fins, peu compacts et saturés d'eau. Pendant la brève durée de la secousse, les forces de contact entre les grains sont rompues et ceux-ci, libérés, sont mis en suspension. La charge des bâtiments sur le sol n'est alors plus supportée par les voûtes formées grâce aux chaînes de forces de contact. Cette charge se transmet alors à la suspension qui, comme une éponge, se densifie progressivement en expulsant de l'eau jusqu'à retrouver de nouvelles chaînes de forces qui soutiendront l'édifice. Au cours de ce phénomène transitoire qui dépend de la perméabilité du sol, le sol a perdu sa portance: des constructions massives peuvent s'enliser brutalement, parfois de plusieurs mètres, comme de lourdes pierres jetées dans la boue.

Par effet de dilatance, un sol peut changer de viscosité et ne plus supporter sa charge



La Giddy House est une ancienne artilerie, construite en 1888 à Port-Royal, en Jamaïque. La portance du sol liquéfié lors du séisme de 1907 n'a pas été suffisante pour soutenir le poids du bâtiment.

Un phénomène similaire se produit au démarrage d'une avalanche de sol à la suite de pluies soutenues. Le temps qu'il faut à l'avalanche pour démarrer dépend fortement de la compacité du milieu granulaire. Si l'empilement est lâche, le glissement se fait instantanément et mobilise l'ensemble du massif. Pour un milieu compact, au contraire, rien ne se passe dans un premier temps. Puis le sol s'effondre lentement. En effet, il faut que suffisamment d'eau entre dans les pores pour que les grains s'écartent et aient assez de latitude pour s'écouler. Comme dans la liquéfaction, la vitesse à laquelle s'effectue cette dilatance des grains dépend de la perméabilité du sol. Une avalanche de sol compact et fin, peu perméable, mettra plus de temps à se déclencher que si le sol est composé d'un sable grossier et plus perméable.

DE LONGUES COULEES SOUS-MARINES

Les mécanismes à l'origine de ce phénomène ont été étudiés ces dernières années à l'échelle du grain, expérimentalement par l'équipe d'Olivier Pouliquen à l'université d'Aix-Marseille et numériquement à Montpellier. Ces travaux ont montré que, soumis à un cisaillement, l'assemblage de grains se déforme peu à peu, par petits mouvements, à mesure que la pression dans les pores s'équilibre. Cette phase, dont la durée augmente avec la viscosité du fluide et diminue avec la taille des grains, est appelée fluage et précède le déclenchement de l'avalanche.

Que se passe-t-il une fois l'avalanche déclenchée? Du fait de sa viscosité, le fluide va-t-il ralentir l'avalanche ou, au contraire, contribuer à ce qu'elle se propage plus loin par un effet de

lubrification entre grains? C'est une question cruciale pour la prévention des risques. Des avalanches sous-marines ou côtières peuvent mobiliser des masses considérables de débris, se propager sur des pentes faibles à plus d'une centaine de kilomètres. Elles endommagent les câbles sous-marins et peuvent sectionner des forages au large. Il y a 8000 ans, le glissement de terrain de Storegga, à la bordure continentale de la Norvège, a mis en mouvement des milliers de kilomètres cubes de sédiments. En engendrant un tsunami dont la vague a dépassé par endroits la dizaine de mètres, il a dévasté les côtes norvégiennes et a atteint l'Écosse!

Les interactions des grains avec le fluide jouent un rôle majeur dans la propagation de l'avalanche. Lors de la mise en mouvement des sédiments au niveau des pentes continentales, les grains gagnent en inertie et entraînent l'eau dont ils sont entourés. Il s'agit alors d'une suspension s'écoulant sur le fond marin. Contrairement aux avalanches dans l'air, les grains restent longtemps sans contacts entre eux, sous l'effet lubrificateur de l'eau de mer; l'avalanche sous-marine peut ainsi se propager sur une très grande distance (voir la figure page précédente, à gauche). Mais l'effet dépend aussi de l'énergie initiale communiquée aux grains; c'est pourquoi la géométrie initiale des massifs joue un rôle important dans l'éventuelle prévision de la distance d'arrêt.

Les travaux dont nous avons fait état ici ont permis de dégager certains paramètres qui contrôlent l'équilibre des grains et leur comportement dynamique dans des situations où les interactions entre grains et celles avec le fluide sont importantes – des situations que l'on rencontre fréquemment en sciences de la Terre et en ingénierie. Dans ce champ de recherche, les simulations numériques ont l'intérêt de donner accès à un ensemble de paramètres que l'on peut faire varier librement, mais aussi de voir l'organisation détaillée en volume des grains et de mesurer les forces, aspects très difficiles à étudier dans les expériences.

Les simulations numériques se révéleront sans doute aussi fécondes dans les recherches portant sur le cas où les grains sont immergés non pas dans une phase fluide unique, mais dans un mélange diphasique constitué par exemple d'air et d'eau. Une telle situation est courante en sciences des sols ou dans les procédés agroalimentaires (fabrication du cous-cous, par exemple), et cela appelle des études nouvelles: lorsqu'un milieu granulaire n'est que partiellement saturé d'eau, les effets de capillarité produisent une adhésion entre les grains, comme dans les pâtes ou la boue. Ainsi pourra-t-on mieux comprendre comment l'eau nouille et colle les grains, que ce soient ceux d'une préparation agroalimentaire, d'un milieu géologique ou... d'un château de sable. ■

BIBLIOGRAPHIE

E. Guyon, J.-Y. Delenne et F. Radjai, *Matière en grains*, Odile Jacob, 2017.

F. Radjai et al. (dir.), *Powders and grains 2017*, 3^e conférence internationale sur la micromécanique des milieux granulaires 3-7 juillet 2017, Montpellier, EPJ Web of Conferences, vol. 140, 2017 (accès libre sur www.epi-conferences.com).

J. Amarsid et al., *Visco-inertial regime of immersed granular flows*, *Physical Review E*, vol. 96, article 012901, 2017.

S. Andreotti et al., *Les Milieux granulaires*, EDP Sciences, 2011.

P. Mutabaruka et al., *Transient dynamics of a 2D granular pile*, *European Physical Journal E*, vol. 38, article 47, 2015.

GDR MiDi, *On dense granular flows*, *European Physical Journal E*, vol. 14(4), pp. 341-365, 2004.



MESSAGES

Les scientifiques savent depuis longtemps que les microbes ont joué un rôle capital dans le développement de la vie sur Terre. L'idée communément admise était que les communautés microbiennes fonctionnent sur la base d'une compétition pour les ressources.

Mais une profusion de nouvelles données sur les microbes qui neurent

les fonds marins et les eaux souterraines dans le monde entier a révélé que de nombreuses espèces collaborent avec d'autres.

Ces découvertes suggèrent que la coopération entre microorganismes serait le mode de fonctionnement standard de la vie microbienne et la force motrice de la biosphère.

LES AUTEURS



JEFFREY MARLOW
postdoctorant au
département de biologie
évolutive et organismique
de l'université Harvard,
aux États-Unis



ROGIER BRAAKMAN
chercheur
au département
d'ingénierie civile
et environnementale
du MIT, aux États-Unis

L'esprit d'équipe des microbes

La loi du plus fort ne prime peut-être pas chez les microorganismes. Au contraire, la coopération entre espèces serait fréquente. Au point d'influer sur le climat.

Huit cents mètres sous la surface de l'océan, au large de la côte de l'Oregon, les phares du submersible *Alvin* illuminent une oasis de vie colorée. Des tapis moelleux de microbes blancs, jaunes et orange recouvrent le fond marin parsemé de champs de paourdes et de moules. Des poissons aux yeux globuleux – des sébastes à bouche jaune – observent le sous-marin avec méfiance, tandis que des panaches de bulles s'élèvent de monticules composés de roches à dominante calcaire. L'auréole lumineuse attire les visiteurs comme un leurre et révèle graduellement le décor semblant tout droit sorti d'un autre monde.

Quelques heures plus tôt, lors de cette expédition de 2010, l'un de nous (Jeffrey Marlow) s'était glissé dans la grande sphère en titane qui constitue l'habitacle de l'*Alvin*, en compagnie de deux autres explorateurs. Nous avons collé nos

visages aux fenêtres circulaires en même temps que nous descendions dans un kaléidoscope de teintes bleutées. Notre destination était Hydrate Ridge, une zone rocheuse où de vastes quantités de méthane suintent de la croûte terrestre. La découverte de sites semblables à Hydrate Ridge a explosé ces dernières années (une seule expédition dans l'est du Pacifique, en 2016, en a exhumé 450) et les scientifiques s'efforcent aujourd'hui de comprendre leur impact sur l'environnement. Le méthane est, après tout, un puissant gaz à effet de serre: bien qu'il ne compose que 0,00018% de l'atmosphère, il représente 20% de son potentiel de réchauffement. Selon des estimations, 10% du méthane qui se retrouve dans l'atmosphère chaque année remonte du fond des océans. Une libération totale du méthane du plancher océanique mènerait à une apocalypse climatique, mais quelque chose empêche le gaz d'atteindre la surface: les microbes qui s'en nourrissent dans les roches.

Ces microbes, qui résident sous le lit microbien blanc et les éclats de coquilles de palourdes, consomment du méthane avec une incroyable voracité. Quoique minuscules pris séparément, ils forment d'impressionnantes colonies, capables de modeler des paysages, de réguler les écosystèmes et de modifier le climat de la planète. D'où leur vient ce pouvoir? De leur faculté à coopérer. Les scientifiques connaissent ces microorganismes depuis des décennies. Pourtant, ils restent nimbés de mystère sur de nombreux aspects. Une des principales inconnues à leur sujet est l'étendue de leur influence: occupent-ils seulement des niches du plancher océanique ou sont-ils ubiquitaires? Plus généralement, leur tendance à la coopération est-elle exceptionnelle dans le monde des microbes ou banale? On a longtemps pensé que ces organismes se disputaient les ressources. Et si la coopération était leur mode de fonctionnement par défaut? Nous étions là – un faisceau de lumière suspendu dans les profondeurs noires – pour déterminer à quel point l'esprit d'équipe régnait ici-bas.

DES MICROBES INSAISSISSABLES

En un sens, notre voyage pour recueillir des organismes microscopiques dans les grands fonds constituait le prolongement des recherches visant à comprendre comment la Terre fonctionne – comment les éléments tels que le carbone, l'azote, le soufre et le phosphore migrent entre les écosystèmes et comment les gaz à effet de serre se retrouvent dans l'atmosphère. Après tout, nous vivons dans un monde microbien: de l'intérieur de la croûte océanique jusqu'aux poussières des déserts en suspension dans l'atmosphère, on détecte des microbes presque partout où nous regardons. Et les scientifiques savent depuis longtemps que ces microorganismes jouent un rôle dans la répartition des éléments cités plus haut et qu'ils ont participé à façonner le visage de la Terre.

Mais l'approche qu'ont suivie les chercheurs pour étudier le monde microbien a limité leur compréhension de ces mécanismes globaux. Pendant des décennies, ils se sont concentrés sur des espèces prises individuellement et sur leurs composants moléculaires. Parmi les masses de microbes entre les grains de sable, ils ont isolé quelques organismes dont ils ont exploré la biochimie et le rôle des gènes. Cette approche a livré quantité d'informations sur ces espèces, ainsi que sur la façon dont les cellules et les biomolécules fonctionnent en général. Mais lorsque les chercheurs ont ensuite pris du recul pour comprendre la biosphère dans son ensemble, d'importantes lacunes subsistaient dans leur édifice théorique. Ils n'avaient réussi à isoler qu'une infime fraction des microbes observés dans la nature, ce qui suggérait que les espèces composant les

communautés bactériennes complexes étaient étroitement liées, d'une façon impossible à répliquer en laboratoire. De plus, la coexistence de nombreuses espèces prospères, jouant souvent des rôles complémentaires, semblait contredire l'idée selon laquelle une lutte acharnée pour les ressources régissait les écosystèmes microbiens.

En outre, les mesures de l'activité métabolique d'une espèce (sa vitesse de production d'oxygène ou de consommation d'azote, par exemple) en laboratoire correspondaient rarement aux valeurs observées dans le monde réel, car les organismes que les scientifiques réussissent à isoler sont souvent plus vigoureux que ceux qui ne se laissent pas prendre. Autrement dit, le tout était parfois supérieur, parfois inférieur, mais jamais égal à la somme des parties.

DANS LE TUBE D'ALVIN

Mais aujourd'hui, un nombre croissant de preuves suggèrent que les interactions microbiennes jouent un rôle central dans la vie de ces écosystèmes et expliqueraient nombre d'observations. Au cours des dix dernières années, les progrès du séquençage et de l'imagerie, entre autres, ont permis aux chercheurs d'étudier des communautés microbiennes comme un tout. Les dernières découvertes indiquent que la collaboration est un moteur

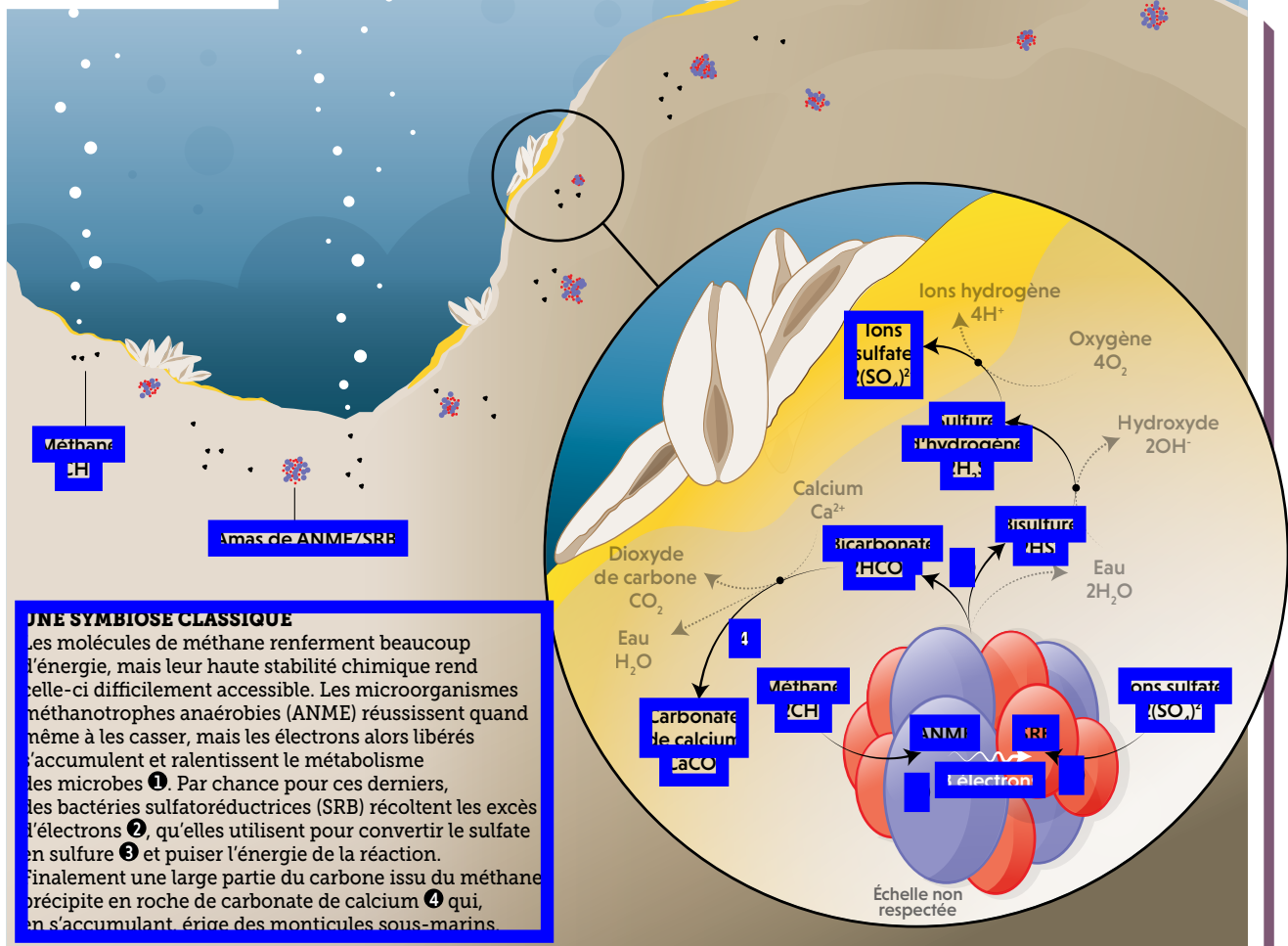
Un microbe se nourrissait de méthane, l'autre respirait du sulfate

essentiel de la biosphère et de son évolution: en partageant énergie, information génétique et fonctions métaboliques avec leurs voisins, les microbes s'ouvrent à de nouveaux modes de vie et deviennent capables de coloniser des habitats jusque-là inhospitaliers.

A Hydrate Ridge, le bras robotique d'*Alvin* plonge un tube en plastique dans un tapis microbien à l'aspect de mousse. Le tube s'enfonce facilement, mais rencontre soudain une résistance et un choc se propage jusqu'au sous-marin. Finalement, le bras perce la couche rebelle et recueille un échantillon qui laisse un mince panache de poussière sédimentaire derrière lui.

LE MYSTÈRE DES MOLÉCULES MANQUANTES

Une partie du méthane et du sulfate produits dans les fonds marins s'évanouit à l'intérieur des couches de sédiments et des roches calcaires du plancher océanique. Les scientifiques ont longtemps soupçonné qu'un microbe était responsable de leur disparition, mais sans parvenir à identifier d'espèce capable de consommer ces deux molécules. Finalement, ils se sont rendu compte qu'il s'agissait non pas de un, mais deux types de microbes travaillant de concert.



UNE SYMBIOSE CLASSIQUE

Les molécules de méthane renferment beaucoup d'énergie, mais leur haute stabilité chimique rend celle-ci difficilement accessible. Les microorganismes méthanotrophes anaérobies (ANME) réussissent quand même à les casser, mais les électrons alors libérés s'accumulent et ralentissent le métabolisme des microbes ❶. Par chance pour ces derniers, les bactéries sulfatoréductrices (SRB) récoltent les excès d'électrons ❷, qu'elles utilisent pour convertir le sulfate en sulfure ❸ et puiser l'énergie de la réaction. Finalement une large partie du carbone issu du méthane précipite en roche de carbonate de calcium ❹ qui, en s'accumulant, érigent des monticules sous-marins.

Andis que Jeffrey Marlow et ses collègues le sident jusqu'à un étui collé au fuselage.

Plus tard dans l'après-midi, dans le vaste laboratoire du navire, l'équipe examine la coupe transversale d'une trentaine de centimètres récupérée. Sous le tapis blanc, la boue beige se transforme en une matière poisseuse truffée de cailloux – la croûte qui a brièvement résisté à nos efforts – pour finalement se réduire à un mélange gris foncé. Le réservoir microbien que nous chassons se trouve dans la couche la plus sombre, qui empest l'œuf pourri. Des travaux menés dans les années 1980 avaient montré que c'était là, dans ces colonies bactériennes des fonds marins, que le méthane produit plus en profondeur dans la roche et le sulfate provenant

de l'eau de mer environnante disparaissaient sous deux des sédiments. Mais les tentatives d'identifier une ou plusieurs espèces microbiennes consommant à la fois du méthane et du sulfate étaient restées vaines. Adoptant une autre approche, des chercheurs ont alors utilisé en laboratoire du méthane et du sulfate comme appâts. Ils ont ainsi montré, au début des années 2000, qu'il n'y avait pas un, mais des couples possibles: des amas cellulaires de deux types de microbes caractérisés par des activités métaboliques distinctes. L'un se nourrissait de méthane, l'autre respirait du sulfate.

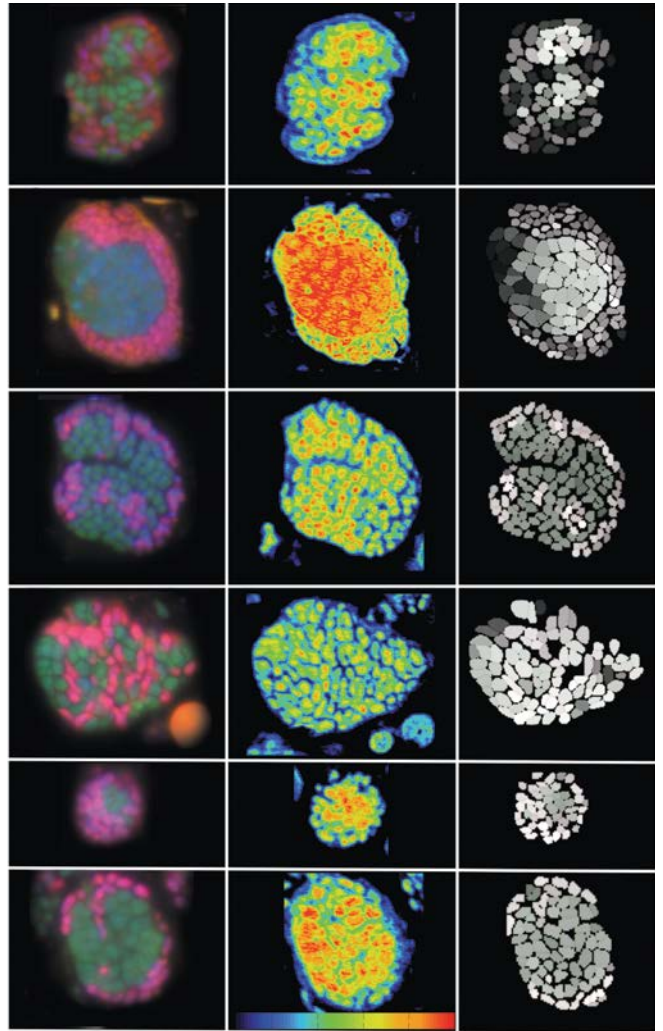
Ce mécanisme – l'oxydation anaérobie du méthane, c'est-à-dire en l'absence d'oxygène – serait impossible sans cet appariement entre

organismes méthanotrophes (qui consomment du méthane) anaérobies et bactéries sulfatoréductrices. Le méthane est une molécule de haute énergie, mais très stable : il est difficile pour une cellule d'en casser un exemplaire, et ainsi de libérer des électrons et d'alimenter son métabolisme en énergie. Les organismes méthanotrophes anaérobies peuvent s'acquitter de cette tâche, mais en contrepartie produisent une surabondance d'électrons, dont l'accumulation devrait en temps normal interrompre leur métabolisme. Toutefois, les déchets d'un microbe sont parfois un trésor pour d'autres : les bactéries sulfatoréductrices utilisent l'excès d'électrons pour transformer les sulfates en sulfure (ce qui confère au sédiment son odeur putride) et exploitent l'énergie produite lors de la réaction. C'est une symbiose classique : les organismes méthanotrophes anaérobies bénéficient d'un service rapide de collecte des ordures, et les bactéries sulfatoréductrices profitent du raccordement au réseau électrique.

Notre expédition à Hydrate Ridge a montré que la consommation symbiotique de méthane se produisait non seulement dans les sédiments, où le phénomène avait été découvert, mais aussi à l'intérieur des roches carbonatées qui forment d'énormes monticules autour du méthane. En fait, s'il arrive que l'interaction des organismes méthanotrophes anaérobies et des bactéries sulfatoréductrices se produise à l'échelle microscopique, des recherches dans la mer Noire, le golfe du Mexique et d'autres lieux ont montré que le processus est omniprésent. Il absorbe environ 80% du méthane sortant du fond marin et construit des reliefs carbonatés sur de grandes échelles.

DES MICROBES COMPLÉMENTAIRES

Les eaux profondes – qu’elles soient marines ou continentales – regorgent d’exemples d’interactions microbiennes, et les séquences d’ADN obtenues ces dernières années à partir de cellules microbiennes dans les eaux souterraines et des sédiments océaniques révèlent à quel point ces communautés sont réellement interconnectées. À mesure qu’a augmenté le nombre de séquences d’ADN échantillonnées, deux conclusions étonnantes se sont imposées. Premièrement, les bactéries et les archées (le troisième grand domaine du vivant aux côtés des bactéries et des eucaryotes, les organismes constitués de cellules à noyaux) sont bien plus diversifiées qu’on ne l’imaginait – le nombre de branches de l’arbre de la vie a explosé. Mais peut-être encore plus surprenant, leurs génomes sont ridiculement petits: beaucoup ne disposent pas de toute l’information génétique nécessaire pour construire une cellule fonctionnelle ou pour

**UNE COLLABORATION DE PROXIMITÉ**

Dans les fonds océaniques, des archées méthanotrophes anaérobies (à gauche en vert) et des bactéries sulfatoreductrices (en rose) vivent associées au sein de petits agrégats, ici observés par diverses techniques d'imagerie

miner à son terme la conversion des nutriments en énergie. « Ce que nous constatons systématiquement lorsque nous explorons de nouveaux environnements, déclare Laura Hug, professeure de microbiologie environnementale à l'université de Waterloo, au Canada, et membre d'une équipe ayant découvert un certain nombre de nouvelles espèces microbiennes, c'est que la communauté dans son ensemble a la capacité de remplir une certaine fonction, comme le recyclage de l'azote. Toutes les pièces sont présentes. En revanche, identifier un seul organisme qui présente toutes les pièces dans son propre génome, cela n'arrive quasiment jamais. »

Le génome des cellules récemment découvertes est souvent incapable de produire toute une palette des constituants de l'ADN (les nucléotides) et des protéines (les acides aminés). Probablement acquièrent-elles ces

Constituants auprès des cellules voisines qui ont des excédents. Ces communautés semblent également extraire l'énergie de l'environnement grâce à un processus collectif: des cellules effectuent certaines conversions chimiques, puis, en aval, d'autres lancent de nouvelles réactions avec le produit obtenu. Ce partage de constituants cellulaires et de ressources énergétiques à la fois requiert et permet la cohabitation de divers organismes.

Bien que des cellules proches parentes et à proximité luttent pour acquérir les mêmes ressources, la moisson récente d'informations génétiques suggère qu'à plus grande échelle, l'évolution a favorisé la spécialisation et la collaboration. De même que l'économie mondiale mise sur les atouts locaux et l'échange de biens, les communautés microbiennes des eaux souterraines et du plancher océanique optimisent l'exploitation des rares ressources et survivent dans des environnements *a priori* hostiles grâce à la division du travail.

Comment de telles symbioses émergent-elles? Certains scientifiques pensent que la promiscuité au sein de communautés denses est un facteur essentiel. À mesure que des organismes étroitement liés se reproduisent, leur progéniture reste dans les parages. Cette proximité lui offre l'avantage d'accéder aux ressources parentales, comme un étudiant habitant près de la maison familiale y retournerait pour laver son linge ou piocher dans le

réduisent le taux de partage global et la condamnent à une mort certaine. (Ce scénario s'appelle également la tragédie des biens communs, terme inventé pour décrire un groupe d'agriculteurs partageant des terres; chaque agriculteur est motivé pour avoir un troupeau de bêtes aussi important que possible, ce qui conduit au surpâturage et à la ruine financière pour tous.) Ces dynamiques montrent que la collaboration et le partage sont favorisés lorsque plusieurs générations de la même espèce s'enracinent sur un même territoire, un principe connu sous le nom de sélection de groupe.

Toutefois, ce mécanisme de sélection de groupe est-il le seul responsable de l'existence des collaborations microbiennes ou d'autres facteurs entrent-ils en jeu? Des indices sont venus de plusieurs centaines de mètres au-dessus des suintements de méthane, dans les eaux de surface où ce gaz rencontre une mer baignée de soleil, une zone riche en énergie lumineuse mais appauvrie en nutriments comme l'azote et le phosphore. En effet, les eaux de surface tropicales et subtropicales ont longtemps été considérées comme des «déserts» océaniques, et ce jusque dans les années 1980, quand les scientifiques ont commencé à se pencher de plus près sur ces environnements et ont découvert que les microbes y abondaient.

À l'instar des microbes des eaux souterraines et des sédiments océaniques récemment détectés, ces microbes de surface ont un génome réduit et il est impossible d'en cultiver un sans ajouter des cocktails complexes de nutriments au milieu de culture – un signe clair que ces espèces ont besoin les unes des autres pour survivre. Pourtant, alors que les microbes sédimentaires sont concentrés dans les interstices laissés par les particules minérales – des conditions idéales pour que la sélection de groupe opère –, les microbes de surface flottent librement, constamment chahutés par l'environnement. En l'absence de promiscuité entre voisins, la sélection de groupe ne peut expliquer leur coopération. Une autre force doit être à l'œuvre.

LE PACTE DE PROCHLOROCOCCUS

Une seule goutte d'eau de la surface de l'océan tropical contient environ un million de microbes. Un sur dix est une cyanobactérie connue sous le nom de *Prochlorococcus*. Il s'agit du plus petit et du plus abondant organisme photosynthétique de la planète. L'un de nous (Roger Braakman) a sondé avec des collègues l'ADN de *Prochlorococcus* pour comprendre comment son métabolisme avait évolué ces dernières centaines de millions d'années. Nous avons créé un arbre de parenté «métabolique» de ce genre de

En milieu hostile, les communautés survivent grâce à la division du travail

trigo. La sélection naturelle favorise donc les gènes qui font que ces ressources sont partagées lorsque les générations suivantes restent proches les unes des autres.

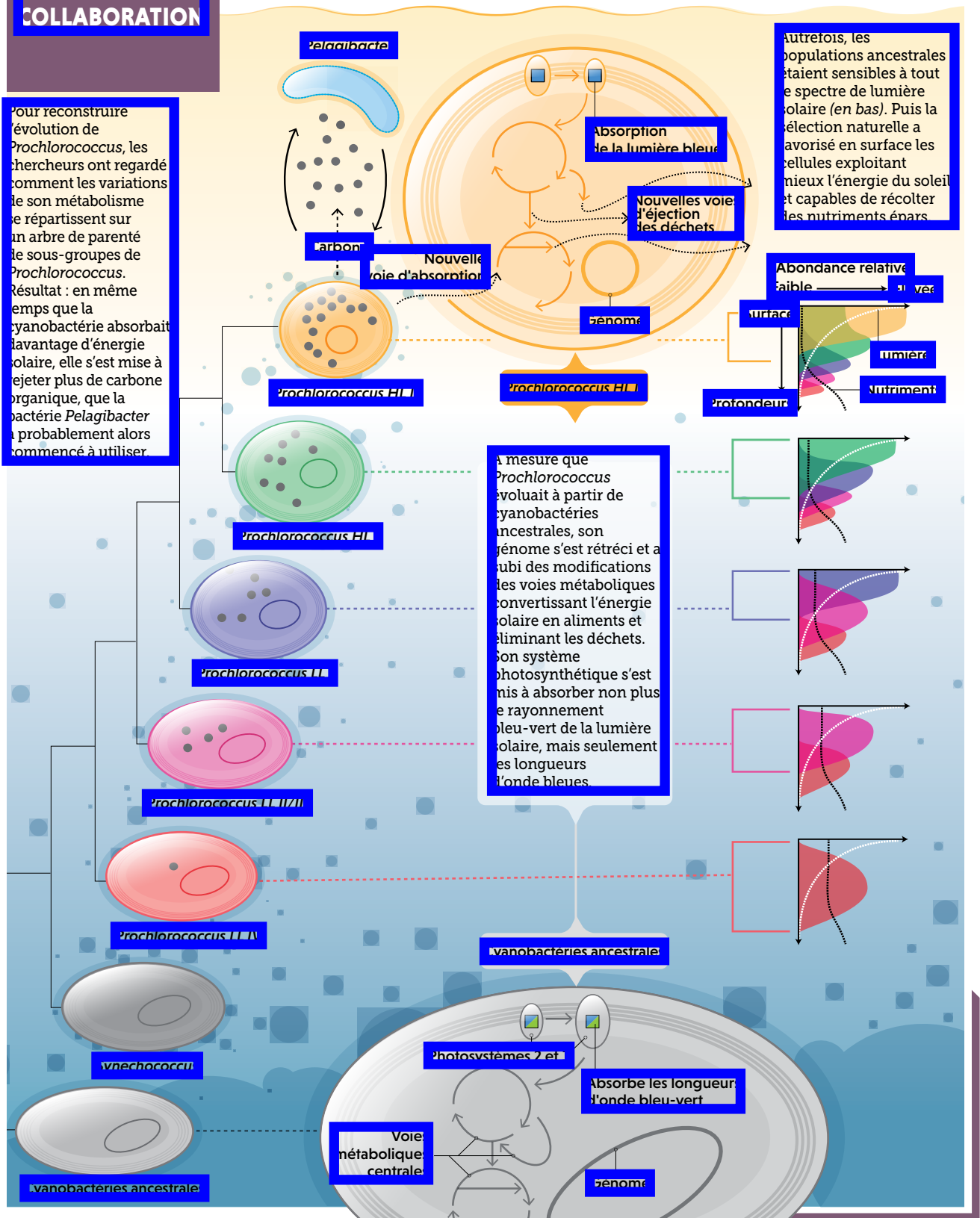
Mais que se passe-t-il si la proximité physique entre les parents et la progéniture diminue et qu'apparaissent des cellules génétiquement divergentes et profiteuses, autrement dit l'équivalent cellulaire de pique-nissiette? Ces cellules récoltent les avantages des ressources partagées sans payer le coût de leur fabrication, envahissent la communauté,

HISTOIRE D'UNE COLLABORATION

Pour reconstruire l'évolution de *Prochlorococcus*, les chercheurs ont regardé comment les variations de son métabolisme se répartissent sur un arbre de parenté de sous-groupes de *Prochlorococcus*. Résultat : en même temps que la cyanobactérie absorbait l'avantage d'énergie solaire, elle s'est mise à rejeter plus de carbone organique, que la bactérie *Pelagibacter* a probablement alors commencé à utiliser.

Il y a des millions d'années, deux des microorganismes marins les plus abondants — *Prochlorococcus* et *Pelagibacter* — se sont associés. Les déchets de l'un sont devenus les déchets de l'autre. Leur collaboration a posé les

bases de l'oxygénation des océans — un phénomène qui a révolutionné la vie sur Terre. Des études récentes du métabolisme des deux organismes ont révélé comment leur partenariat est né et s'est développé.



cyanobactérie en cartographiant les variations de son réseau métabolique – les réactions biochimiques qui convertissent les éléments nutritifs en constituants cellulaires – sur un arbre de parenté génétique qui montre les relations entre les différents types de *Prochlorococcus*.

Or en comparant cet arbre métabolique des sous-groupes de *Prochlorococcus* avec les caractéristiques de leurs milieux d'origine (la quantité de lumière reçue et la concentration en nutriments), nous nous sommes rendu compte que l'évolution avait sélectionné des lignées de cellules capables de récolter au mieux l'énergie solaire et de moissonner des nutriments clairssemés. Dans le même temps, puisqu'absorber davantage d'énergie accélère le métabolisme du carbone, les cellules ont commencé à être saturées en carbone. Elles ont alors libéré sous forme de déchets des molécules riches en énergie, renfermant du carbone organique, à la manière d'une soupape d'échappement relâchant la pression d'une cocotte. Les cyanobactéries *Prochlorococcus* sont ainsi devenues des usines cellulaires, absorbant la lumière du soleil et rejetant du carbone organique.

Ce flux de déchets, à son tour, est devenu une ressource attrayante pour les microbes incapables de synthétiser eux-mêmes leurs constituants et qui doivent donc les puiser dans leur environnement. Or parmi ces organismes marins figure *Pelagibacter*, qui est

Prochlorococcus pourrait utiliser comme énergie lorsque le soleil se couche. Chaque membre de ce partenariat recyclerait ainsi les déchets de l'autre, dont il extrairait de l'énergie par ailleurs inutilisée.

Ces découvertes, publiées en 2017, éclairent d'un jour nouveau l'évolution passée des communautés microbiennes dans les océans et les autres habitats de surface. À mesure que les cellules ont appris à mieux exploiter les nutriments épars à leur disposition, ces ressources se sont encore raréfiées, ce qui a modifié en conséquence le régime alimentaire de tous les autres organismes. Ainsi, les brique-assiette n'ont pas leur place dans ces écosystèmes, car les cellules qui ne font que consommer et ne produisent pas de carbone organique sont moins aptes à acquérir d'autres nutriments tels que l'azote ou le phosphore. La consommation de nutriments et la production de déchets organiques sont inextricablement liées, ce qui renforce le lien *Prochlorococcus*-*Pelagibacter* favorisé par la sélection naturelle. Cette puissante entente montre que la promotion des interactions collaboratives au fil de l'évolution ne concerne pas seulement les groupes de cellules génétiquement apparentées avec une forte promiscuité. Au moins dans certains cas, ce moteur évolutif serait simplement un sous-produit – une boucle de rétroaction autoamplificatrice – d'une sélection agissant sur des cellules individuelles.

HARMONIE OU LOI DE LA JUNGLE ?

Le partenariat *Prochlorococcus*-*Pelagibacter* est peut-être né de quelques changements génétiques mineurs, mais ses effets à long terme ont été énormes. Lorsque les ancêtres de *Prochlorococcus* et de *Pelagibacter* ont colonisé les océans, il y a entre 600 et 800 millions d'années, les eaux étaient pauvres en oxygène et riches en fer. Le fer est un composant essentiel des protéines photosynthétiques (qui convertissent l'énergie lumineuse en oxygène), mais il est très peu soluble en présence d'oxygène et était donc très peu disponible pour former des protéines. Cet obstacle aurait pu empêcher les organismes photosynthétiques de s'étendre en pleine mer, car le fer serait devenu une ressource rare si ceux-ci s'étaient installés au large et avaient commencé à y produire beaucoup d'oxygène. Mais un élément a tout de même rendu possible cette extension: les déchets de carbone organique de *Prochlorococcus* – alimentés par la croissance du microbe aux côtés de *Pelagibacter* – se lient remarquablement bien au fer, ce qui a dû augmenter sa disponibilité, même en présence d'oxygène. Nous avons donc émis l'hypothèse suivante: grâce à l'affinité de leurs déchets organiques pour le fer, *Prochlorococcus* et *Pelagibacter* ont contribué au

En surface, la cyanobactérie libère du carbone, que *Pelagibacter* consomme

aujourd'hui presque aussi abondant que *Prochlorococcus* dans les océans de surface tropicaux et subtropicaux. Pour étudier la relation entre ces deux groupes microbiens, nous avons créé un arbre métabolique pour *Pelagibacter*, où nous avons identifié un chemin évolutif qui refermait la boucle collaborative des deux groupes taxonomiques. Alors que *Prochlorococcus* consomme du dioxyde de carbone et libère des composés carbonés organiques, *Pelagibacter* absorbe ces composés et relâcherait à son tour d'autres molécules que



Prochlorococcus et Pelagibacter ne sont que deux représentants de la communauté microbienne très diverse qui habite l'océan. D'une manière générale, l'ensemble des microorganismes (c'est-à-dire les organismes unicellulaires microscopiques) jouent un rôle clé dans les cycles des éléments. Ils sont responsables d'une grande part des flux de matière et d'énergie. Leur implication dans le cycle du carbone est illustrée par le rôle des microorganismes photosynthétiques (le microplancton) qui transforment annuellement environ 40 millions de tonnes de carbone inorganique (le CO_2 , qui provient à l'échelle annuelle de l'atmosphère et de l'océan profond) en matière organique. Environ la moitié de ce carbone synthétisé constitue l'un des déchets dont il est question dans l'article (le carbone organique jeté à la mer par *Prochlorococcus*). Ce carbone est utilisé en tant que substrat de croissance par des microbes, bactéries comme archées. Cette utilisation s'effectue à des temps allant de minutes à quelques semaines.

es composés riches en carbone sont roqués contre des substances contenant de l'azote, du phosphore, du soufre ou du fer. L'excrétion par un microorganisme d'hormones régulant la division cellulaire d'une autre espèce de microbe représente un autre exemple d'interaction.

Mais comment toutes ces cellules peuvent-elles s'épauler alors qu'elles sont présentes de manière diluée dans l'océan? En effet, si l'on considère une distribution homogène de mille millions de microbes dans un litre d'eau de mer, la distance moyenne entre une cellule et sa voisine la plus proche correspond à

différentes natures. Certains consistent en une agrégation de cellules photosynthétiques: la matière organique produite par ces cellules rend ces dernières gluantes et agit comme une colle naturelle. D'autres sont des particules constituées de matière non vivante: la matière organique peut, sous l'action du mouvement de l'eau, former ce qu'on appelle des «microgels». Enfin des débris d'organismes multicellulaires morts ou des particules provenant de sédiments ou d'une rivière peuvent aussi être très attractifs pour les communautés microbiennes.

L'ensemble de ces microneiches constituent un objet d'étude formidable pour de futures découvertes sur la richesse des interactions microbiennes dans l'océan et leur impact sur le fonctionnement des communautés microbiennes. Leur étude n'en est qu'à ses débuts. Dans notre laboratoire, notamment, nous nous intéressons au contenu en carbone organique et en fer des batchs et à leur accessibilité pour les microbes dans l'océan Austral. Cette question et d'autres nous amènent à explorer des océans lointains, où nous découvrons des écosystèmes fascinants et vulnérables comme celui de la région des îles Kerguelen. Nous avons observé qu'au début du printemps, des associations se créent entre certaines diatomées (des algues unicellulaires) et des espèces de bactéries et d'archées. Ce résultat suggère que les diatomées façonnent l'habitat pour les microbes et influencent ainsi leur diversité.

NGRID OBERNOSTERER
Laboratoire d'océanographie microbienne,
CNRS, Sorbonne Université

Une part
des microorganismes
se regroupent au sein de
patchs riches en substrats

Environ 100 à 200 fois son diamètre...
En fait, il s'avère qu'une part des microorganismes se regroupent au sein de patches riches en substrats (les composés organiques de manière générale, qui contiennent des éléments tels que du carbone, de l'azote, du phosphore, du soufre, etc.) et que les microbes vont et viennent entre ces patches et l'eau de mer environnante.

De taille variable (du nanomètre à quelques centimètres), ces patchs se trouvent partout dans l'océan, du fond jusqu'en surface. Ils peuvent être de

le développement de la photosynthèse qui a oxygéné les océans. La vie sur Terre n'a plus jamais été la même.

Toutefois, les interactions microbiennes pourraient ne pas toujours reposer sur des partenariats harmonieux. Certains scientifiques pensent même que les relations stables et mutuellement bénéfiques constitueraient l'exception plutôt que la règle. «C'est un monde impitoyable, met en garde le biologiste John McCutcheon de l'université du Montana. Des relations bénéfiques dans un contexte donné peuvent mener, dans des conditions légèrement différentes, au parasitisme ou à la compétition.» La loi de la jungle que John McCutcheon se plaît à voir dans le monde microbien est influencée en partie par le phénomène qu'il étudie: l'endosymbiose, autrement dit l'assimilation d'un organisme complet par un autre. Par exemple, les mitochondries qui produisent l'énergie à l'intérieur de nos cellules ont été il y a longtemps des cellules à part entière et membres d'un groupe connu sous le nom d'alphaprotéobactéries.

L'ENDOSYMBIOSE, PAS SI SYMBIOTIQUE ?

L'endosymbiose a conduit à certaines des innovations les plus importantes de l'histoire de la vie, car elle a produit les composants qui caractérisent les cellules complexes et ainsi ouvrir la voie à l'évolution des plantes et des animaux. Compte tenu de ces exemples positifs, «il est facile d'imaginer les endosymbioses comme une sorte de relation symbiotique, presque amicale, entre les deux organismes», alerte John McCutcheon, mais je pense que c'est une interaction relevant davantage de l'exploitation». Et le chercheur de noter que l'histoire de l'évolution est probablement jonchée de tentatives infructueuses d'endosymbiose tenant davantage de la prédation ou du parasitisme.

Des biologistes ont en outre constaté des taux élevés de renouvellement des endosymbiotes (les organismes qui vivent à l'intérieur d'autres cellules). De la même manière qu'un colocataire indélicat finira par être mis à la porte, une espèce incorporée peut elle aussi être remplacée par un autre postulant. Cela est souvent observé dans le phénomène d'endosymbiose, ce qui dénote une relation compliquée pour les deux partenaires. Les recherches de John McCutcheon confirment que les interactions des organismes sont bien une force dominante. Elles pointent aussi les vraies motivations de leurs acteurs: «Chaque organisme ne voit que son intérêt et toutes les interactions ne sont pas bénéfiques pour tout le monde.»

Les communautés microbiennes interconnectées ont un autre inconvénient plus fondamental: si jamais un membre du groupe faiblit,

le reste du réseau qui dépend de lui peut s'effondrer. En théorie, l'existence de dépendances métaboliques au sein des communautés bactériennes collaboratives rend celles-ci plus fragiles que les colonies composées d'organismes autonomes où chacun s'occupe de ses affaires.

En 2012, la microbiologiste Ashley Shade, de l'université d'État du Michigan, et ses collègues ont examiné 378 études de microbiotes (l'ensemble des microorganismes d'un milieu) du sol, de la mer, d'eau douce, de l'intestin d'animaux ou utilisés dans l'industrie afin de dégager des principes généraux sur la résistance des communautés aux perturbations externes et sur leur aptitude à revenir à l'état initial. Les chercheurs ont découvert que 56% des analyses faisaient état de modifications métaboliques généralisées après une perturbation – par exemple, l'exposition à la chaleur a poussé une communauté de microbes extraits du sol à cesser de consommer de l'azote. Seulement 10% de ces communautés perturbées ont finalement retrouvé un fonctionnement normal.

Ces résultats doivent être interprétés avec prudence, car bon nombre des études compilées portant sur la résistance des communautés n'ont pas examiné leur éventuel rétablissement. Et pour celles qui l'ont fait, les chercheurs qui les ont menées n'ont peut-être pas attendu suffisamment longtemps pour observer un rétablissement. Néanmoins, une chose est sûre: la biosphère est incroyablement résiliente et se relève toujours après une perturbation majeure – nous ne serions pas là autrement –, même s'il reste encore beaucoup à comprendre sur le fonctionnement des processus de récupération, leur rapidité et les changements qui persistent à long terme.

L'étude des communautés microbiennes et du rôle de ces coopérations n'en est qu'à ses débuts. Les résultats obtenus à ce jour suggèrent que les partenariats métaboliques sont des moteurs de l'évolution et ouvrent aux organismes des territoires nouveaux à coloniser. Mais on commence tout juste à étudier ces interactions au-delà de l'échelle microscopique, et replacer ces nouvelles découvertes dans leur contexte réel reste un défi majeur. Combien d'espèces peuvent interagir de façon efficace? Comment les principes généraux qui façonnent ces interactions changent-ils dans différents environnements ou à différentes échelles d'espace et de temps? Existerait-il un réseau global de microbes en interaction? Dans ce cas, les influences de l'homme sur l'environnement se propageraient à travers tout la chaîne et entraîneraient des conséquences mondiales imprévisibles. Continuer à décoder ces réseaux microbiens est d'une importance cruciale à l'heure du changement climatique. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. W. Becker et al.,
Co-culture and biogeography of *Prochlorococcus* and SAR11, *The ISME Journal*, en ligne le 11 février 2019.

R. Braakman et al.,
Metabolic evolution and the self-organization of ecosystems, *PNAS*, vol. 114(15), pp. E3091-E3100, 2017.

J. J. Marlow et al.,
Carbonate-hosted methanotrophy represents an unrecognized methane sink in the deep sea, *Nature Communications*, vol. 5, article 5094, 2014.

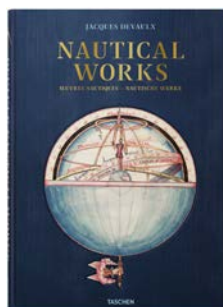
Le monde selon JACQUES DEVAULX

En 1583, un jeune pilote et cartographe rassembla, dans un magnifique manuscrit enluminé, toute la science de la « navigation aux étoiles » de son temps, de l'art de se repérer en mer aux cartes les plus récentes du monde.



ECANOMETRIE

Jacques Devaulx proposa une utilisation originale de cet instrument. Le Normand Toussaint de Bessard l'avait conçu en 1574 pour déterminer l'écart angulaire entre les nords géographique et magnétique. Devaulx imagina de s'en servir pour déterminer la longitude en l'utilisant pour relever la position des astres et en faisant appel à une règle magique.



Devaulx, *Nautical Works* (Taschen, 2018), fac-similé intégral du manuscrit de 1583

MANUSCRIT

En 1583, Jacques Devaulx, jeune marin havrais, présenta au duc de Joyeuse, gouverneur de Normandie et mignon du roi Henri III, un ensemble de livrets qu'il avait conçus sur la science nautique.

Encouragé par le duc, Devaulx en fit un somptueux ouvrage enluminé.

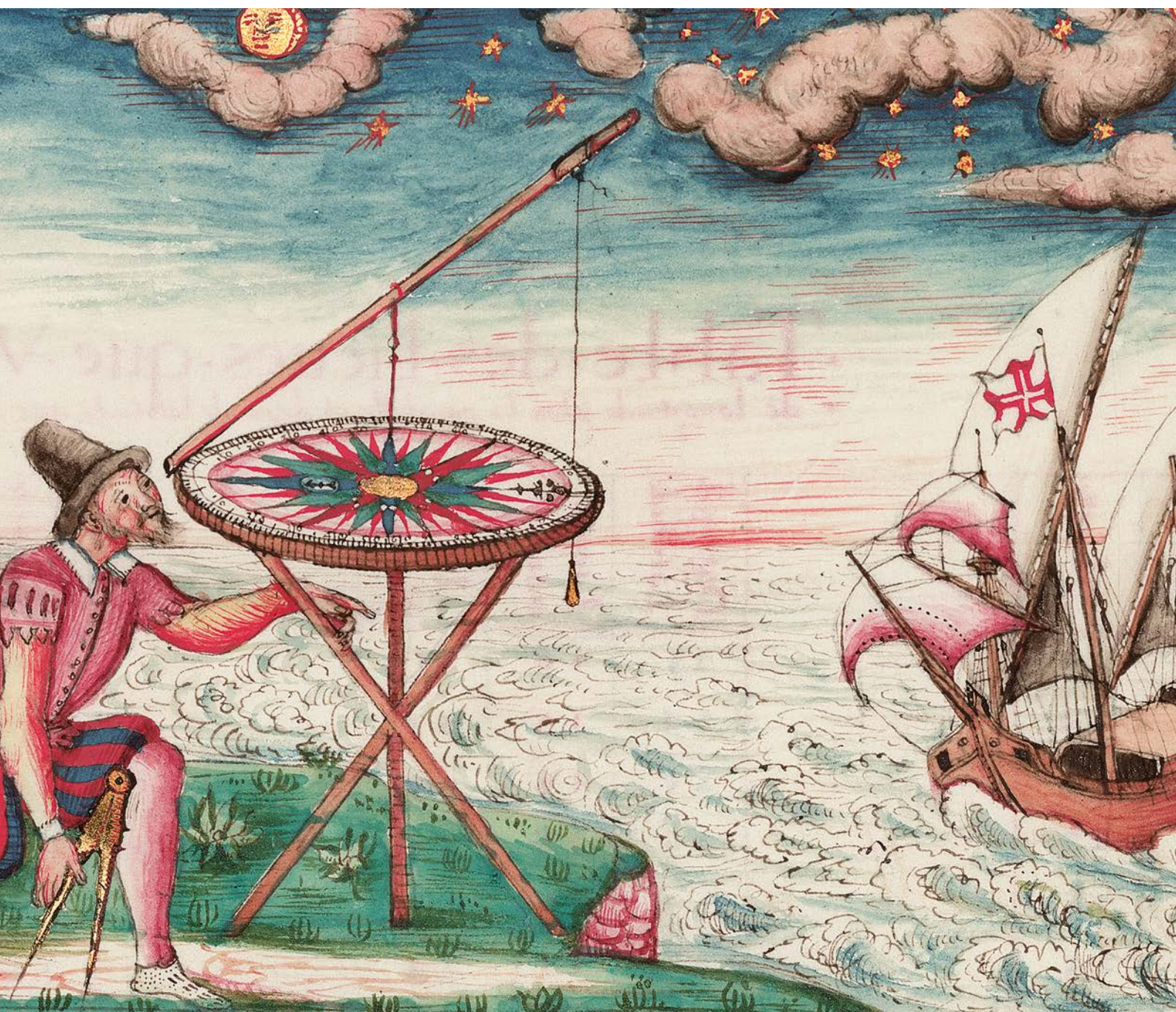
Devaulx y compila avec talent les savoirs et savoir-faire du pilote et cartographe, s'appuyant sur les traités les plus récents.

Il proposa aussi une piste nouvelle pour déterminer la longitude en mer, la grande difficulté des marins de l'époque.

MANUSCRIT



ELISABETH HEBERT, agrégée de mathématiques, présidente de l'ASSP, association d'histoire des sciences de l'IREM de Rouen



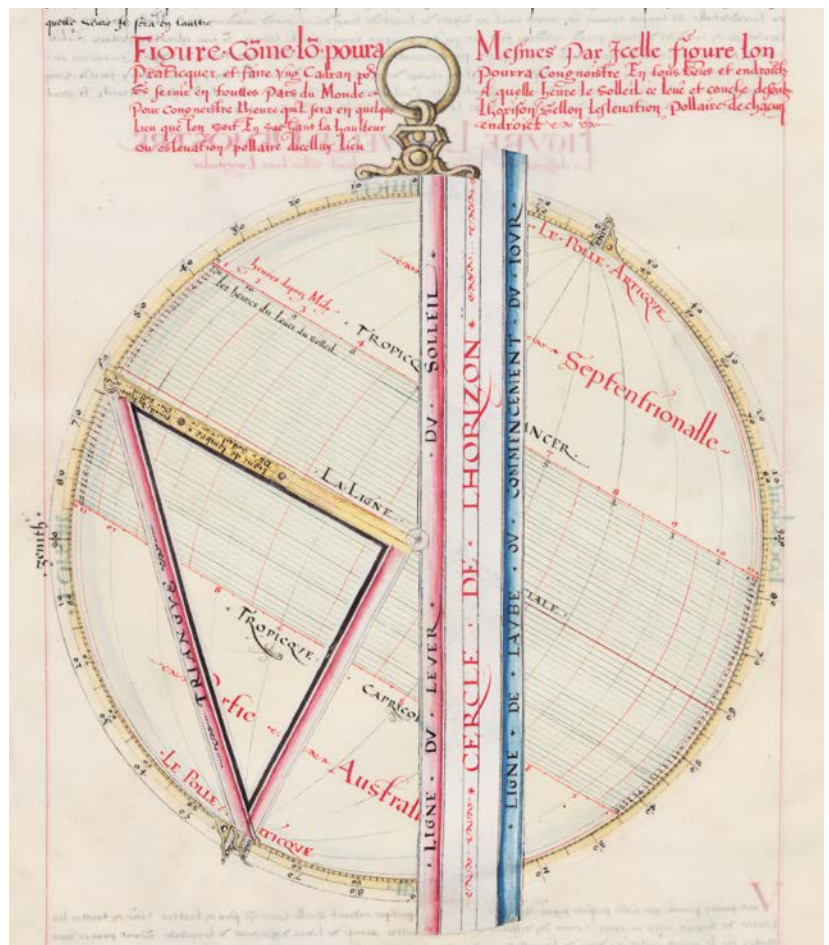
Pour qui s'intéresse à l'histoire de la navigation, *Les Premières œuvres de Jacques Devaulx, pilote en la Marine* constituent un trésor incontournable, car sans équivalent. Daté de 1583, ce manuscrit met en scène la «navigation aux étoiles». Servie par une iconographie soignée et esthétique, cette science en plein essor en ce xvi^e siècle, mais assez obscure pour le lecteur non spécialiste, devient séduisante, et de multiples auteurs et éditeurs puisent dans ses images pour illustrer des articles touchant à la navigation. Mais au-delà du charme de ces images, quels messages scientifiques précis portent-elles? À quels textes s'articulent-elles?

C'est à ces questions que l'association sciences en Seine et patrimoine, à Rouen, s'est attachée à répondre ces dernières années. Cette équipe d'amateurs, dont je fais partie, est habituée à explorer les fonds anciens des bibliothèques de Haute-Normandie, et tout particulièrement ceux de Dieppe et Rouen. Ces derniers recèlent de nombreux manuscrits de navigation, des traités rédigés par des marins qui ont laissé les traces de leur savoir, des notes de cours, des textes mis en forme lors de captivités, des copies de documents... Manuscriles, ces traces font entrer dans l'intimité de marins investis dans une science nautique qui se décline sur le papier, révélant des personnalités où bravoure et délicatesse s'entrecroisent.

UNE FAMILLE DE CORSAIRES

En 2008, nos recherches avaient ainsi conduit à la publication d'un traité de navigation du xviii^e siècle, le manuscrit qu'un marin dieppois, Jean-Baptiste Denoville, avait rédigé en 1760 durant sa captivité en Angleterre. Conservé à la Bibliothèque municipale de Rouen et ignoré jusqu'alors, ce document a contribué à forger l'histoire maritime de la région. Dans cette dynamique, nous souhaitons dévoiler le savoir du pilote havrais Jacques Devaulx, consigné dans le manuscrit de 1583. La rencontre à l'automne 2011 du regretté Jean-Yves Sarazin, un chartiste éclectique, soucieux de donner à la science la possibilité de séduire par la beauté picturale, sonna le lancement de cette nouvelle aventure éditoriale. Son statut de directeur des Cartes et Plans à la Bibliothèque nationale de France (BnF), où le manuscrit est conservé, nous fournit par ailleurs l'occasion de créer un partenariat avec les éditions Taschen et de publier en décembre dernier le fac-similé commenté du manuscrit sous le titre *Nautical Works*. Notre enquête a révélé un texte créatif à la pointe de la modernité de l'époque.

Jacques Devaulx est né entre 1555 et 1560 dans une toute jeune ville portuaire, Le Havre, au sein d'une famille de corsaires. Au fil des siècles, la Manche avait façonné la Normandie.



Les invasions vikings, les conflits avec les Anglais, mais aussi les échanges commerciaux avaient forgé des marins aguerris à la navigation, désireux de participer à des expéditions vers des terres lointaines, capables de traverser les océans pour devenir corsaires ou pêcheurs à Terre-Neuve. Ainsi, dès le début du xvi^e siècle, des marins normands avaient rivalisé avec les Portugais.

Dieppe avait vu son heure de gloire quand ses navires du riche armateur dieppois Jean Ango avaient atteint l'Indonésie, Sumatra, ou encore le Brésil et le Canada. Le bois du Brésil, l'ivoire de Guinée, puis la morue de Terre-Neuve et l'or des corsaires assuraient d'énormes bénéfices aux armateurs dieppois et rouennais. Rouen, alors deuxième ville du royaume de France, était un port à la fois maritime et fluvial et une cité commerçante cosmopolite. Mais le chenal de la basse-Seine qui approvisionnait Rouen s'ensablait, alors que la taille des nefs ne cessait de croître. Pour faciliter cet approvisionnement et augmenter le pouvoir défensif de la côte de l'Atlantique, François I^{er} avait donc décidé, en 1517, la création d'un port et d'une ville, plus tard dénommée Le Havre.

Le Havre avait cependant émergé très difficilement des marais, la population avant du mal

ASPHÈRE PLATE UNIVERSELLE

Cette voillette, constituée de quatre pièces de papier et munie d'une icelle portant un plomb, est un instrument qui sert à lire sans calcul les nombreuses mesures astronomiques qui lient la date, la latitude, l'heure et la hauteur du Soleil. Elle peut donc servir le cadran solaire.



LE MIROIR DU MONDE

Cette voilve a une double fonction. D'une part, placée sur une projection du globe terrestre, une araignée mobile bordée d'un écliptique doré indique en quels lieux on peut trouver, un jour donné, le Soleil au zénith. D'autre part, en l'absence de l'écliptique, elle permet de préciser la longitude et la latitude des lieux et remplace les longues listes de coordonnées publiées dans les cosmographies. Elle informe aussi sur les décalages horaires entre divers points du globe. Encore faut-il que les continents soient correctement représentés.

Il croître malgré la volonté politique. Venu du Calvados, les grands-parents de Devaulx s'installèrent au Havre en 1525 et bénéficièrent des conditions favorables offertes aux nouveaux habitants. On sait que leurs fils, donc les oncle et père de Devaulx, commerçaient avec la Flandre et s'emparaient à l'occasion de navires anglais, et que Devaulx lui-même épousa en 1584 une fille de corsaire.

Au milieu du XVI^e siècle, Le Havre est tout à la fois arsenal, chantier naval, port de pêche, de commerce et de transit. Du Havre embarquent plusieurs expéditions vers les nouvelles terres d'Amérique. Celles-ci sont composées principalement de huguenots susceptibles de fonder des colonies. Car depuis les années 1530, plusieurs foyers protestants se sont implantés en Normandie, particulièrement à Dieppe, mais aussi à Rouen et au Havre. Le havrais Guillaume Le Testu, tout à la fois explorateur, cartographe, voire corsaire lui aussi, est d'ailleurs l'un d'eux.

Devaulx grandit ainsi dans une ville marquée par de violents conflits entre catholiques et protestants, mais aussi entre Français et Anglais. On connaît peu de choses sur lui. On sait néanmoins qu'il était pilote en charge de missions officielles à travers l'Atlantique et qu'il soutenait fermement la Ligue. cette

«union» dont l'objectif était de maintenir le pouvoir des catholiques et contrecarrer celui des protestants, en particulier lors de la désignation du successeur d'Henri III.

Le 14 avril 1583, Devaulx présente ses travaux au duc Anne de Joyeuse, un mignon du roi Henri III, alors grand amiral de France et gouverneur de Normandie, bientôt gouverneur du Havre. Ses livrets séduisent ce personnage influent, qui engage le jeune homme à produire une œuvre. Le luxueux exemplaire de 1583 lui est dédié; il est très probablement rédigé à partir des livrets originaux, regroupés dans un second manuscrit conservé lui aussi à la BnF. De moindre facture, ce dernier, daté de 1584, mentionne une évolution de son auteur, devenu «pilote pour le roy en la marine». Il est dédié à un membre influent de la Ligue locale, Nicolas de Moy, un militaire terrestre, que Devaulx, dans son hommage, invite à prendre la mer.

NAVIGUER : TOUT UN ART

En 1583, voilà un siècle que, partant à la conquête de terres nouvelles, les navigateurs de pleine mer se familiarisent avec les astres et intègrent les connaissances astronomiques des anciens. Le modèle géocentrique, matérialisé par la sphère armillaire, convient parfaitement aux marins et le modèle héliocentrique révélé en 1543 par l'astronome polonais Nicolas Copernic n'a donc pas cours parmi ceux-ci.

Mais la science nautique englobe bien d'autres aspects: la bonne gestion de la boussole, le tracé de la route, l'usage des instruments permettant le relevé de la hauteur des astres, le calcul des marées, le bon usage des tables de déclinaison du soleil, la détermination de la hauteur du pôle, le calcul ou méthodes de calcul du calendrier... Des savoirs que les Espagnols et Portugais ont fait émerger au début du XVI^e siècle. Les premiers écrits, portugais, ont été copiés et étudiés par les Espagnols. Deux ouvrages espagnols marquent ainsi le développement de la science nautique dans la seconde moitié du XVI^e siècle: le *Breve compendio* de Martin Cortés de 1551, diffusé en Angleterre, et *Arte de navegar*, de Pierre de Médine, publié en 1545 et plusieurs fois réédité en France. Flandre et Italie

Avec la découverte de nouveaux territoires, la cartographie devient un élément central dans la formation du pilote. Les techniques de relevés topographiques, la connaissance des divers types de projection plane de la sphère, les informations les plus récentes sur le tracé des côtes, leur repérage avec des réseaux de roses des vents ou des quadrillages en latitude et longitude, le tracé précis, soigné et esthétique des cartes et, bien sûr, le dessin, sont les savoirs et savoir-faire du cartographe. Plusieurs Normands, souvent regroupés sous le nom de l'école de Dieppe, ont brillé dans ce domaine. Devaulx est l'un de ces pilotes cartographes.

Son manuscrit de 1583 présente une iconographie extrêmement riche. Si les lettrines peuvent être la réalisation d'une tierce personne, le texte scientifique et son illustration sont d'une telle homogénéité dans les graphies et les couleurs qu'il est plausible qu'un même personnage soit l'auteur du texte et de l'image. Plusieurs arguments vont en faveur de l'hypothèse d'un marin aux multiples compétences – pilote, cartographe et artiste. En premier lieu, Devaulx, marin et fils de marin, ne vivait pas dans un univers qui l'invitait à prendre des artistes talentueux à son service. Ensuite, pendant plusieurs décennies, les cartes manuscrites de l'école de Dieppe, mais aussi les multiples traités de navigation manuscrits, témoignent de la diversité des compétences de leurs auteurs, qu'il s'agisse du travail de Guillaume Le Testu ou de la carte de l'Atlantique réalisée en 1613 par Pierre Devaulx, le jeune frère de Jacques.

La valeur scientifique des dessins qui mettent en scène la science nautique fait de ce manuscrit un « best-seller » des livres sources dans ce domaine. Devaulx tire profit des rares gravures sur bois qui illustrent sobrement les traités imprimés de l'époque. Il réalise des calques qu'il colorise avec éclat ou complète par des décors convenus. En plusieurs occasions, il fait preuve de plus de créativité encore. Ainsi, il met en scène un texte portant sur l'usage d'un instrument dans des conditions délicates – texte souvent imprimé, mais jamais illustré jusqu'alors. Et à plusieurs reprises, il peint des bandeaux extrêmement pédagogiques, véritables bandes dessinées où se succèdent les usages ordinaires d'un même instrument dans diverses situations.

Devaulx s'appuie sur des ouvrages imprimés, traités de navigation ou d'astronomie largement diffusés en Europe, mais aussi sur quelques textes peu diffusés, publiés par d'autres Normands. Pour partie, ce savoir livresque lui a été transmis par voie orale, ce qui donne une certaine originalité à plusieurs formulations et approches. Tant pour l'iconographie que pour le savoir, deux ouvrages imprimés lui servent de référence: la *Cosmographie* de l'Allemand Pierre Apian (1524) et *L'Art de naviguer*, l'ouvrage de Médine en français (1554).

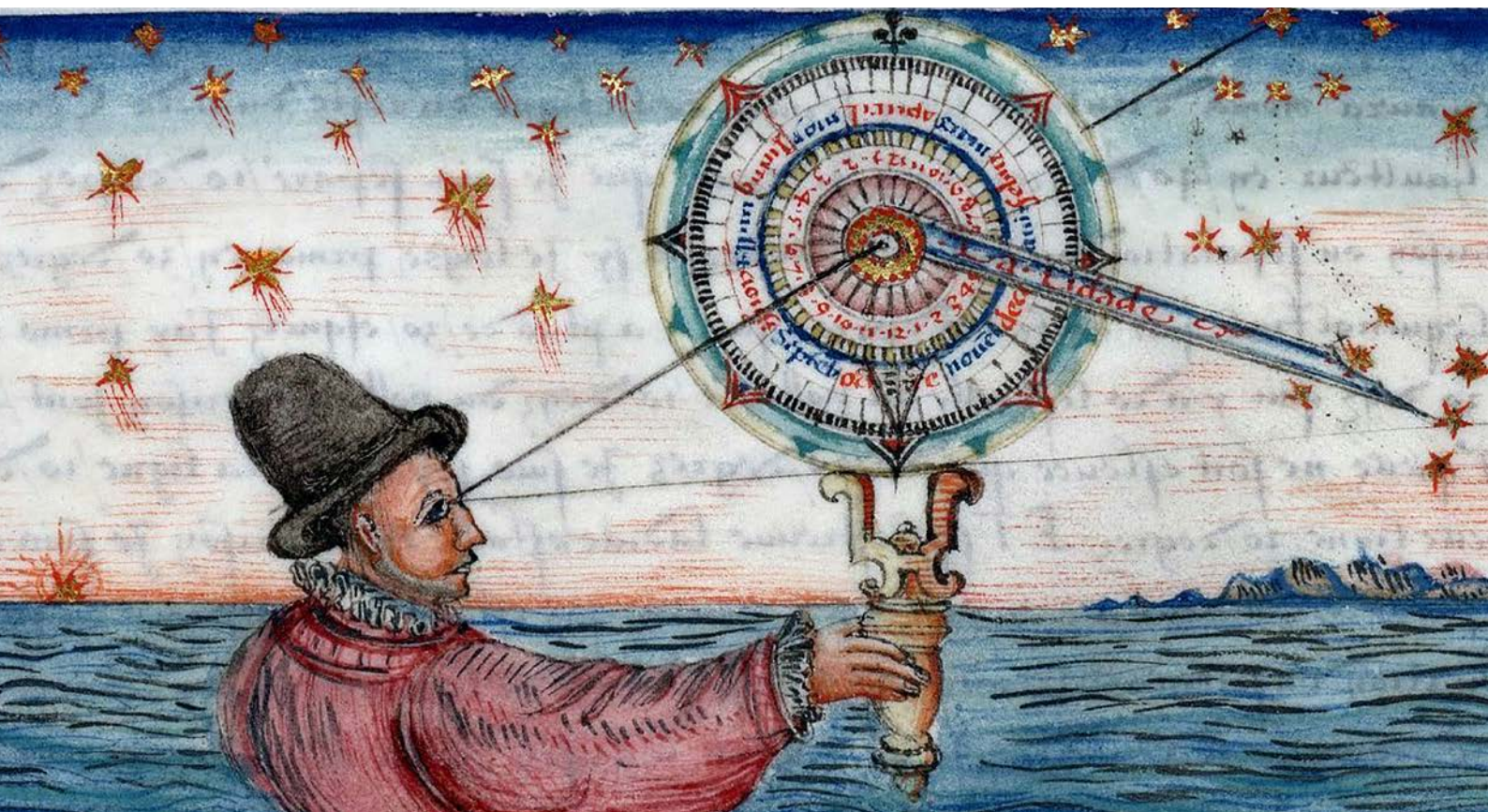
À LA POINTE DE LA MODERNITÉ

Ce dernier fournit la trame du savoir de base que développe Devaulx. Il y est question de cosmographie, rhumbs (une unité de mesure d'angles), routes, latitude, déclinaison et hauteur du Soleil, hauteur de l'Étoile polaire et du Pôle, marées et Lune, calendrier – des éléments en usage depuis quelques décennies en navigation et reformulés à plusieurs reprises. Hormis quelques passages qui sont la copie exacte de Médine, il est d'ailleurs difficile de repérer la provenance des formulations parfois confuses que Devaulx adopte.

Car la navigation de ce xvi^e siècle est une « navigation aux étoiles », où le Soleil, la Lune et l'Étoile polaire jouent un rôle essentiel. En prenant appui sur ces astres mobiles, les lois de la navigation ne peuvent qu'être complexes. Et parce que le marin ne dispose que des seules informations délivrées par le ciel, tout naturellement, le traité de Devaulx commence par des considérations astronomiques, inspirées de Médine, un auteur qui puise sa cosmographie

EN OCÉAN

Cet instrument inspiré de Michel Coignet, contemporain de Devaulx, permet de connaître l'heure la nuit en observant la position de certaines étoiles. Après un réglage de la date de l'observation, on vise l'Étoile polaire par le trou central et on tourne la règle mobile ou alidade vers Kochab, une étoile de la Petite Ourse. Aux côtés de sa mise en scène (ci-dessous), reprise du cosmographe Pierre Apian, Devaulx présente l'instrument sous forme de volvelle: un disque de papier accompagné d'une alidade mobile.



aux mêmes sources qu'Apian. C'est souvent ce cosmographe que Devaulx copie pour réaliser ses volvelles, instruments constitués de disques mobiles en papier, qui se trouvent ainsi à la disposition des lecteurs. Plusieurs volvelles, comme la «Sphère plate universelle» (voir la figure page 76) ou le «Miroir du monde» (voir la figure page 77), concernent les phénomènes liés aux cycles du Soleil.

Installé dans un port où se croisent des marins venus de toute l'Europe, Devaulx bénéficie par ailleurs des dernières nouveautés. Il produit des cartes où les découvertes de terres nouvelles coexistent avec certaines élucubrations de ses prédécesseurs sur des territoires quasiment inexplorés. La carte essentielle, celle de l'océan Atlantique, extrêmement détaillée, s'étale sur une double page. On remarque aussi une carte des côtes de l'Europe orientée vers le sud, annotée de données spécifiques aux marées, un type d'informations rarement précisé. Le manuscrit met aussi en valeur la nouvelle cartographie du globe terrestre en jouant sur quelques-unes des multiples projections explorées au xvi^e siècle. Notamment, la carte servant de support à la volvelle «Miroir du monde» présente un hémisphère Nord élargi jusqu'au tropique du Capricorne, tandis que deux demi-globes mettent en valeur l'Ancien et le Nouveau Monde.

C'est avec beaucoup de zèle que Devaulx introduit la très récente réforme du calendrier grégorien mise en place en France en décembre 1582. Il s'attarde peu sur le calcul des éléments calendaires des marins, calcul devenu encore plus complexe. Mais il adapte à

BIBLIOGRAPHIE

J. Devaulx, **Nautical Works**, dir. J.-Y. Sarazin et E. Hébert, Taschen, 2018.

J.-B. Denoville, **Le Traité de navigation**, Point de vues, 2008.

Le manuscrit de Jacques Devaulx numérisé sur le site Gallica : <https://bit.ly/2UfAeNa>

Le site de l'ASSP consacré à Jacques Devaulx : assprouen.free.fr/devaulx

Des maquettes en papier et animations sur les volvelles : assprouen.free.fr/dossiers/volvelles.nhp

Une maquette en plastique de la volvelle «Sphère plate universelle» : www.astromaquettes21.com/5.html

le nouveau calendrier le tableau des nouvelles lunes, deux volvelles mettant en correspondance les calendriers zodiacal et grégorien, et les tables de déclinaison du Soleil.

Devaulx puise aussi abondamment dans *l'Instruction nouvelle* de Michel Coignet, texte tout récent, publié en flamand en 1580 et en français en 1581. Les hauteurs du Soleil et de l'Étoile polaire, utiles à la détermination de la latitude, sont, au xvi^e siècle, relevées d'ordinaire avec un astrolabe nautique ou, depuis peu, une arbalétrille, un bâton muni de curseurs. Devaulx, comme Coignet, propose des évolutions de ces instruments, en augmentant le nombre de curseurs et en représentant l'astrolabe avec une règle mobile ou alidade qui permet de tenir compte de la déclinaison du Soleil.

MESURER LA LONGITUDE

Avec plus de fantaisie, il s'approprie «l'hémisphère nautique» inventé par ce même Coignet. Cette demi-sphère armillaire équipée d'un curseur et d'une alidade permet des relevés astronomiques. L'instrument est toutefois si encombrant et complexe qu'il est resté plus théorique que pratique. Néanmoins, alors que son concepteur l'affectait à la détermination de la latitude, Devaulx l'utilise pour trouver la longitude... Une reconversion surprenante. En effet, la détermination de la longitude est la grande difficulté à laquelle se heurtent les marins jusqu'à la fin du xviii^e siècle. Les théories les plus fantaisistes circulent, et Devaulx a aussi la sienne : la longitude est le double de la déclinaison magnétique – une proposition totalement erronée, mais qui a le mérite de croiser deux problèmes non élucidés, les mesures de la longitude et de la déclinaison magnétique. Cette dernière, qui est l'écart angulaire entre les nords géographique et magnétique, est alors reconnue et souvent quantifiée, mais demeure inexpliquée. Plusieurs auteurs tentent en vain de la maîtriser, comme le Normand Toussaint de Bessard, en 1574, dont s'inspire Devaulx d'une curieuse façon (voir la figure page 74).

On le voit, pour séduire les puissants à travers son manuscrit, Devaulx est soucieux de se présenter comme un pilote compétent, maîtrisant la science nautique de base. Mais il soigne aussi son image de pilote informé des dernières découvertes tant en cartographie qu'en hydrographie et se plaît à jouer le précurseur. Le zèle qu'il mit à adopter le tout nouveau calendrier grégorien et à produire un document d'une rare beauté ne put que plaire au très catholique Duc de Joyeuse et contribua sans doute à sa promotion. Devaulx n'en profita pas beaucoup, cependant. Il mourut en 1597 âgé d'une quarantaine d'années. Ne subsisteront sous forme manuscrite que quelques rares traités de navigation, témoins d'une science objet de fascination pour les pilotes. ■



R

ENDEZ-VOUS

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

AU-DELÀ DU BITCOIN

L'idée des cryptomonnaies, concrétisée pour la première fois avec le bitcoin, a donné naissance à une industrie foisonnante et variée, qui propose nombre d'améliorations.

WATMOUR:



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

Il est rare qu'une invention technique soit parfaite à sa naissance. Nos automobiles et nos avions ressemblent assez peu aux premiers exemplaires. C'est vrai aussi des machines à laver, des téléviseurs, des téléphones et surtout des ordinateurs. Le domaine des monnaies cryptographiques, ou cryptomonnaies, a bénéficié aussi de cette diversification et de ce perfectionnement progressif. Le bitcoin fut la première de ces monnaies numériques et si, bizarrement, certains le considèrent comme indépensable, le foisonnement de variantes montre qu'il n'est que le premier pas d'un processus évolutif technique.

CE QU'EST UNE CRYPTOMONNAIE

Nous décrivons un modèle simplifié des cryptomonnaies, parfois prudemment dénommées cryptoactifs, et nous verrons comment en dérivent les variantes qui s'écartent du modèle de base.

La première caractéristique d'une cryptomonnaie est d'être numérique: jamais vous ne tiendrez en main un bitcoin, un ripple ou un ether (du réseau Ethereum), qui sont les trois plus importantes cryptomonnaies, dans une famille qui en compte plus de deux mille.

L'existence d'une telle monnaie se fonde sur celle de comptes informatiques et d'une base de données, appelée *blockchain*, ou «chaîne de pages», détenant toutes les informations sur l'état de tous les comptes. Cette base de données des comptes est recopiée dans la mémoire d'une multitude d'ordinateurs, les nœuds validateurs (ou nœuds complets), organisés en

réseau et communiquant par Internet. La base de données permet à chaque nœud validateur de connaître l'état de tous les comptes: le compte A détient n unités de la monnaie, le compte B en détient m , etc. Tout le monde peut connaître l'état de tous les comptes en interrogeant certains nœuds validateurs.

Cette recopie de la blockchain dans la mémoire de chaque nœud validateur la rend infalsifiable: si un détenteur de la blockchain veut la modifier en sa faveur, par exemple pour s'attribuer plus d'unités monétaires, les autres refuseront sa version falsifiée et s'en tiendront à la version commune. La monnaie est décentralisée et sans autorité centrale: personne n'a le pouvoir d'en perturber le fonctionnement, qui s'appuie sur un consensus.

UN PROTOCOLE, DES COMPTES, DES TRANSACTIONS

Le protocole de fonctionnement d'une cryptomonnaie est déterminé avant son émission et en indique les propriétés particulières, par exemple en fixant la fréquence d'ajout de nouvelles pages à la blockchain. Le protocole organise le rythme des émissions de nouvelles unités monétaires et leur circulation d'un compte à un autre. Ce protocole est initialement choisi par un ou plusieurs spécialistes, mais une fois programmé et lancé, plus personne en particulier ne le contrôle et il ne peut être modifié qu'après un accord général, selon les règles d'un protocole.

Détenir un compte, c'est connaître la clé secrète du compte, qui est délivrée au



Jean-Paul Delahaye a récemment publié: *Les Mathématiciens se plient au jeu*, une sélection de ses chroniques parues dans *Pour la Science* (Belin, 2017).

moment de sa création à celui qui en demande l'ouverture. Des programmes appelés *wallets* ou porte-monnaie, fonctionnant sur smartphone ou microordinateur, permettent à chacun de créer ses propres comptes, en général gratuitement et sans avoir à fournir son identité. Cet anonymat de la détention des comptes rend les monnaies cryptographiques analogues à l'argent liquide circulant sous forme de pièces ou de billets : on détient anonymement des unités monétaires, on en reçoit et on en dépense.

Si vous connaissez la clé secrète d'un compte, vous pouvez agir sur lui et par exemple demander un virement d'une unité de ce compte en faveur d'un autre compte dont vous connaissez le numéro. Cette opération est une transaction et tous les nœuds du réseau qui gardent la blockchain en sont informés ; ils modifieront de la même façon leur copie de la blockchain pour prendre en compte la modification des soldes des comptes après le virement. Toutes les copies de la blockchain sont synchronisées et parfaitement identiques.

Le contrôle collectif et consensuel de la blockchain, donc sur les comptes en général, engendre la confiance et permet de croire que détenir une unité de la cryptomonnaie vaut quelque chose. Cette valeur d'une unité s'établit comme pour une action boursière ou une œuvre d'art, par la rencontre entre ceux qui veulent en vendre et ceux qui veulent en acheter et qui se mettent d'accord sur un prix d'échange. Des sites internet appelés *exchanges*, ou « plateformes d'échange », organisent ces rencontres. Certaines cryptomonnaies ne valent presque rien, d'autres comme les bitcoins valent assez cher (le 29 mars 2019, 1 bitcoin valait environ 3650 euros, ou 4100 dollars). Pour comparer l'importance des cryptomonnaies, on multiplie le nombre d'unités dans la blockchain par le cours d'une unité en dollars. Le 29 mars 2019, cette capitalisation globale atteignait environ 72 milliards de dollars pour les bitcoins, 15 pour les ethers et 13 pour les ripples. Douze monnaies cryptographiques dépassaient à cette date une capitalisation de 1 milliard de dollars (voir <https://coinmarketcap.com>).

FONCTIONNEMENT PARFAIT SANS AUTORITÉ CENTRALE

Avant la mise en marche du réseau des bitcoins le 3 janvier 2009, on pensait impossible de faire fonctionner une monnaie sans autorité centrale. Le protocole du bitcoin a montré que c'est possible. Il fonctionne depuis plus de dix ans et n'a jamais été piraté. Les escroqueries à base de bitcoins, les vols de bitcoins, leur utilisation pour des actions frauduleuses sont comme les escroqueries à base de dollars, les vols de dollars, et

UNE INDUSTRIE AUTOUR DES CRYPTOMONNAIES



Composants électroniques dans une ferme de minage de bitcoins

Divers types d'activités s'organisent autour des cryptomonnaies et donnent naissance à des entreprises, parfois importantes, reposant sur des modèles économiques variés. Mentionnons-en une liste en notant que, souvent, plusieurs types d'activités sont mêlés au sein d'une même société.

Des sociétés vendent des prestations de formation ou de développement d'applications liées aux cryptomonnaies et aux blockchains.

Des sociétés collectent des informations autour des cryptomonnaies, les publient, les vendent, etc.

Les plateformes d'échange jouent le rôle de bureau de change. Elles permettent par exemple d'acheter des ethers en échange d'euros. Elles offrent souvent la possibilité de garder vos achats, ce qui vous évite l'avoir à gérer les clés de vos comptes. Elles gagnent de l'argent en faisant payer des commissions pour les opérations qu'elles réalisent. En France et dans de nombreux pays, elles doivent connaître leurs utilisateurs qui, pour s'inscrire, indiquent et prouvent leur identité.

Des développeurs et fabricants vendent des porte-monnaie électroniques, logiciels ou matériels, permettant de détenir en propre des cryptomonnaies, c'est-à-dire de gérer soi-même les clés de ses comptes. La société française Ledger propose par exemple des dispositifs matériels de sécurisation des clés et des comptes de cryptomonnaies ; elle est à première de sa catégorie et a vendu plus d'un million

de ses dispositifs de sécurisation.

Les concepteurs et fabricants d'outils de minage. Des matériels spécialisés sont souvent nécessaires pour participer aux concours de calcul que sont les preuves de travail. Ce sont soit des assemblages de circuits ASIC (*Application Specific Integrated Circuit*), soit, par exemple pour ethereum, des cartes graphiques. En 2017 et 2018, le marché de ces matériels a représenté plusieurs milliards de dollars. Des firmes sont nées de ce commerce (le chinois Bitmain par exemple) ou en ont profité (fabricants de cartes graphiques).

Des sociétés achètent du matériel de minage et de l'électricité et montent des « fermes de minage » qu'elles font fonctionner. Elles gagnent les unités de cryptomonnaies. Leur rentabilité dépend de la concurrence, du prix qu'elles paient l'électricité et du cours des cryptomonnaies.

Plusieurs milliards de dollars sont à gagner chaque année. Cela a provoqué l'apparition d'importantes firmes. Elles se trouvent en Chine, en Islande, au Canada et là où on peut acheter de l'électricité à moindre coût. Suite à la baisse des cours des cryptomonnaies en 2018, elles sont nombreuses aujourd'hui à rencontrer des difficultés et parfois doivent cesser leur activité. La firme française Bigblock a construit un modèle original : elle déplace, installe et fait fonctionner pour qui le veut les outils de minage dans son usine au Kazakhstan, où elle réussit à acheter de l'électricité à un prix très bas (0,026 euro par kWh).

L'utilisation des dollars pour mener des actions illicites: elles ne concernent pas la monnaie en elle-même, son émission ni son mode de circulation. Ce miracle d'une monnaie numérique sans autorité centrale résulte de l'utilisation de la cryptologie (pour organiser la blockchain et permettre le système de signatures qui protègent les transactions), de la fiabilité des réseaux informatiques et de la capacité de calcul et de mémorisation des ordinateurs modernes.

Le fonctionnement du réseau repose sur des nœuds validateurs qui sont des ordinateurs volontaires toujours connectés, surveillant les transactions et conservant chacun une copie de la blockchain en la mettant à jour en fonction des transactions qui circulent. Il n'est heureusement pas nécessaire d'être un tel nœud validateur pour disposer d'un compte et utiliser la cryptomonnaie: la plupart des détenteurs de comptes ne sont pas des nœuds validateurs.

DÉS INCITATIONS

Pour le travail effectué, une récompense est attribuée aux nœuds validateurs: cette incitation rétribue le service fourni et permet à la cryptomonnaie d'exister. La distribution de cette récompense se fait parfois (et en particulier dans le cas des bitcoins et des ethers) par l'attribution aux nœuds validateurs de nouvelles unités de la cryptomonnaie. Dans le cas des bitcoins, de nouvelles unités sont créées toutes les dix minutes et sont attribuées à un ordinateur du réseau à la suite d'un concours entre les nœuds validateurs. Le concours récompense le premier nœud validateur ayant réussi à résoudre un problème de nature mathématique qui nécessite beaucoup de calculs. Ce mode de distribution de l'incitation est appelé preuve de travail; il a conduit au développement d'une industrie nommée minage, car on extrait de nouveaux bitcoins comme on extrait de l'or d'une mine, mais en menant des calculs massifs plutôt qu'en creusant le sol. Malheureusement, la concurrence fait que ce concours répété est devenu énergivore. Nous y reviendrons quand nous évoquerons d'autres moyens de distribuer l'incitation.

Venons-en aux variantes et perfectionnements possibles

L'anonymat des comptes est, selon les avis, trop faible ou trop fort. Il est trop fort pour certains qui y voient un danger. En effet, une monnaie cryptographique comme le bitcoin permet de détenir et d'utiliser un compte sans jamais révéler son identité, ce qui permet de manipuler les unités de la cryptomonnaie comme de l'argent liquide – mais en fait bien plus liquide que des billets ou des pièces, puisque vous pouvez envoyer en quelques minutes et en toute

discretion l'équivalent de millions de dollars ou d'euros d'un pays vers n'importe quel autre. Cet anonymat est prisé pour le blanchiment d'argent, le paiement de rançons et toutes sortes de trafics. Il en résulte une méfiance envers les cryptomonnaies. Des cryptomonnaies d'État sont annoncées sans qu'on sache toujours leurs propriétés et en particulier leur attitude vis-à-vis de l'anonymat. Elles pourraient exiger des utilisateurs qu'ils n'ouvrent de comptes qu'après avoir donné et prouvé leur identité.

Le ripple, la cryptomonnaie la mieux acceptée du monde bancaire, a introduit des procédures dites de KYC (*know your consumer*) pour limiter l'anonymat. La cryptomonnaie electroneum (88^e en mars 2019) est une cryptomonnaie qui exige de connaître l'identité des détenteurs de ses comptes. Notons aussi que les plateformes d'échange, qui nous sont indispensables pour acheter ou vendre des monnaies cryptographiques contre les monnaies fiduciaires habituelles, exigent presque toujours l'identité de leurs utilisateurs. En résumé, détenir et faire circuler anonymement des monnaies cryptographiques est facile, mais en échanger contre des dollars ou des euros ne l'est pas!

L'ANONYMAT POSE QUESTION

De ce fait, l'anonymat d'une cryptomonnaie de base (comme le bitcoin ou l'ether) est jugé imparfait par certains utilisateurs. Toutes les transactions sont inscrites en clair sur la blockchain auquel tout le monde a accès; cela permet de suivre, de numéro de compte en numéro de compte, le déplacement des sommes importantes. Dans certains cas, cela a permis d'identifier le détenteur d'un compte... et de l'arrêter car il était établi que des trafics illicites étaient liés aux sommes qui circulaient.

Cette situation fait que certains esprits attachés à l'anonymat ont imaginé des modifications dans la conception des blockchains pour empêcher le suivi du déplacement des sommes de compte en compte. Parmi les cryptomonnaies ayant accru cet anonymat en rendant (presque) impossible le suivi des transactions, mentionnons monero, dash, zcash, verge, komodo, PIVX, hirozen, zcoin, nav coin. Le bitcoin intéresse aujourd'hui beaucoup moins les malfaiteurs, qui se sont reportés sur ces monnaies à l'anonymat renforcé et particulièrement sur monero. Plusieurs pays, dont la Chine et la Corée du Sud, ont entrepris d'interdire tout échange anonyme impliquant des cryptomonnaies.

SMART CONTRACTS, ICO ET APPLICATIONS DÉCENTRALISÉES

Lorsqu'une transaction (un virement d'un compte A vers un compte B) est signée et lancée par le détenteur d'un compte à partir de

2

LES ICO OU REÉMISSIONS DE JETONS

son ordinateur ou de son smartphone, elle circule sur le réseau des nœuds validateurs qui ne peuvent que l'accepter et exécuter ce qu'elle demande. L'opération est irréversible. Cette irréversibilité n'existe pas pour les virements dans le monde bancaire classique, où les établissements gardent pendant plusieurs jours la possibilité d'annuler un virement. Cette irréversibilité des transactions en cryptomonnaies est intéressante et a été généralisée avec ce qu'on dénomme des contrats intelligents, ou *smart contracts*. Ce sont des programmes qu'on dépose sur la blockchain de certaines cryptomonnaies et qui ont la capacité de détenir des unités monétaires, d'en recevoir et d'en envoyer automatiquement.

La première cryptomonnaie à offrir un langage puissant pour écrire ces *smart contracts* était ethereum (voir «Du bitcoin à ethereum: l'ordinateur-monde», Pour la Science de novembre 2016, pp. 104-109). L'irréversibilité devient pour un *smart contract* l'impossibilité d'en arrêter le fonctionnement, qui est simultanément sur chaque nœud validateur. Cela interdit de faire exécuter au programme autre chose que ce qui est prévu. Ces programmes qui, une fois définis, ne peuvent plus être arrêtés ou modifiés parce que leur fonctionnement provient du consensus d'exécution du réseau, constituent une nouveauté informatique extraordinaire. Cet ordinateur mondial, décentralisé, parfaitement fiable fait ce qu'on lui demande de faire sans que personne ne puisse l'interrompre ou le corrompre.

Cela permet par exemple de programmer des jeux d'argent et de pari où l'organisateur ne peut pas refuser de payer et ne peut partir avec la caisse quand il perd trop. Le terme d'applications décentralisées (DApp, en abrégé anglo-saxon) est souvent utilisé pour désigner ces *smart contracts*.

Grâce à ces *smart contracts*, on crée des cryptomonnaies qui ont les mêmes propriétés que celles reposant sur des blockchains spécifiques: elles sont sans autorité centrale et surveillées, indirectement maintenant, par les nœuds validateurs d'un réseau. En clair, grâce aux cryptomonnaies permettant les *smart contracts*, on définit facilement de nouvelles monnaies décentralisées sans avoir à mettre en place un réseau nouveau de nœuds validateurs.

Cette possibilité de disposer de l'équivalent d'une blockchain particulière à moindre coût en s'appuyant par exemple sur la blockchain ethereum a engendré l'apparition rapide de nouvelles cryptomonnaies, dont le nombre a explosé depuis 2016. Des cryptomonnaies liées à certaines entreprises voulant lever des fonds ont été introduites par dizaines. Les unités monétaires de ces cryptomonnaies se nomment des jetons (*tokens*) et ces opérations de

Une ICO (pour *initial coin offering*, ou «preémission de jetons») est une méthode de levée de fonds fondée sur une cryptomonnaie liée à l'entreprise qui veut se financer. Les jetons de la cryptomonnaie sont en général créés à l'aide d'un *smart contract* (voir le texte principal). On peut acheter des jetons pendant la phase de démarrage de l'entreprise. Ces jetons sont cotés et échangeables sur les plateformes d'échange de cryptomonnaies. Le plus souvent le bitcoin ou l'ether sert de monnaie intermédiaire: on achète des bitcoins pour ensuite les échanger contre les jetons de l'ICO.

Les jetons de l'ICO donnent des droits particuliers concernant l'entreprise qui les a émis: droits de vote, droits d'usage des services à prix intéressants, etc. Contrairement aux actions mises en circulation lors d'une IPO (*initial public offering*, en français «introduction en Bourse»), les jetons ne représentent pas les parts de l'entreprise. Acheter les jetons d'une ICO revient à prépayer les services qui vont être proposés.

Un exemple est la société Storj Labs à Atlanta (États-Unis).

qui crée un service de stockage massif décentralisé. Les fichiers informatiques à stocker sont chiffrés et découpés en morceaux. On les copie alors avec des redondances pour protéger des accidents – dans la mémoire des ordinateurs acceptant de participer au réseau de stockage. La capacité du réseau dépasse 100 pétaoctets (soit 10^{17} octets), et l'objectif est d'arriver à plusieurs exaoctets (10^{18} octets). Le réseau est déjà composé de 150 000 ordinateurs capables de détenir des morceaux de fichiers confiés à Storj répartis dans 200 pays.

La société Storj Labs a levé début 2017 l'équivalent de 10 millions de dollars via une ICO. Leur jeton, le storjcoin, permet d'acheter de l'espace de stockage sur le réseau Storj; il représente donc un accès privilégié aux services développés. La capitalisation des jetons Storj en février 2019, victime de la baisse générale des cours de l'année 2018) s'élevait à 18 millions de dollars. Si la société réussit, ses jetons se valoriseront.

Contrairement aux IPO, les ICO sont mal réglementées et il est considéré comme risqué de s'introduire sur ces marchés avant que des lois en assainissent et en contrôlent le fonctionnement, ce qui est en cours.





MONTEE EN FLECHE DES STABLECOINS

3

Puisque la volatilité des cours des monnaies

cryptographiques rend impossible leur usage comme « réserve de valeur », ou même comme instrument de paiement, il fallait empêcher cette volatilité.

L'idée la plus simple est

d'offrir à tout détenteur d'une unité de la cryptomonnaie la capacité de l'échanger contre un actif précis ayant une valeur qui, par définition, sera considérée comme fixe, par exemple un dollar. La possibilité de cet échange rend absurde l'attribuer à l'unité en question une valeur moindre. Si, en plus, à chaque fois que quelqu'un veut disposer d'une unité de cette cryptomonnaie, on lui donne la possibilité de l'acquérir à ce coût fixé à l'avance, le cours de la cryptomonnaie ne pourra pas monter. C'est l'idée des *stablecoins*, ou « jetons stables ». Ces *stablecoins*, comme les cryptomonnaies, reposent directement ou indirectement sur une blockchain, ce qui assure la nature décentralisée et irréversible des transactions et du fonctionnement des comptes, et permet l'anonymat. Cependant, il faut que celui qui propose ces échanges 1 contre 1 (par exemple avec le dollar) soit crédible. Il faut pour cela qu'il organise un système d'audit indépendant attestant qu'il met en réserve la contrepartie des unités qu'il fait circuler. Cette contrepartie gardée en réserve par un acteur déterminé constitue un aspect centralisé de la cryptomonnaie. Ceux qui sont attachés à l'idée d'une décentralisation complète considèrent cela regrettable. Insistons sur le fait que la gestion des comptes est décentralisée et qu'un tel *stablecoin* n'est donc pas centralisé comme l'est une monnaie d'État : on gagne donc bien quelque chose, en plus

de la fluidité et de la stabilité du cours, avec les *stablecoins*.

avec leur capitalisation et leur cours en dollars (\$), sont :

JSD Tether : 2 032 525 000 \$

1 USDT = 1,00 \$

JSD coin : 247 268 000 \$

1 USDC = 1,00 \$

True USD : 200 244 000 \$

1 TUSD = 1,01 \$

Nano : 135 067 000 \$

1 Nano = 1,01 \$

Paxos Standard : 118 657 000 \$

1 PAX = 1,00 \$

Dai : 87 789 000 \$

1 DAI = 0,99 \$

Le *stablecoin* dai fonctionne

selon un mécanisme différent de celui décrit plus haut. Ce mécanisme est, lui, totalement décentralisé et s'appuie sur une surcontrepartie en cryptomonnaie (par exemple 1,5 dollar de cryptomonnaie pour 1 dollar de *stablecoin*) qui permet de garantir la stabilité... à la condition que les variations de cours de la cryptomonnaie utilisée pour adosser le *stablecoin* ne soient pas trop brusques. De nouveaux modèles de *stablecoins* totalement décentralisés sont en cours d'expérimentation.

Le succès des *stablecoins*

en 2018 a été remarquable.

De 30 projets de *stablecoins* dont 9 en fonctionnement) au début de 2018, on est passé début 2019 à plus de 160 projets dont 28 fonctionnent).

La capitalisation boursière totale de ces *stablecoins* a doublé durant la même période, passant d'environ 1,5 milliard à presque 3 milliards de dollars. Notons aussi que les *stablecoins* pourraient être plus facilement acceptés par les autorités monétaires : par exemple, les régulateurs financiers de l'État du Texas, aux États-Unis, envisagent de donner aux *stablecoins* un statut de monnaie au même titre que l'euro ou le yen.

évée de fonds se nomment ICO, pour *initial coin offering*, par analogie avec IPO, pour *initial public offering* (« introduction en Bourse »).

Plusieurs milliards de dollars ont pu ainsi être trouvés pour le financement de start-up, qui travaillent en général dans le domaine des cryptomonnaies ou des blockchains. Cependant, contrairement aux IPO, qui sont très réglementées, les ICO ne le sont pas assez et elles ont été utilisées pour organiser diverses escroqueries. Elles sont interdites en Chine et les autorités financières de nombreux pays invitent à s'en méfier. L'émission et la manipulation de ces jetons sont fiables, mais pas ce qu'ils représentent, car les entreprises financées par l'achat de ces jetons sont parfois des coquilles vides. En France, l'Autorité des marchés financiers (AMF) va attribuer des labels pour que les acheteurs intéressés par les ICO puissent y voir clair.

Précisons que d'autres cryptomonnaies ont suivi ethereum en offrant la possibilité sur leur blockchain de déposer des *smart contracts*. Le réseau des bitcoins ne permet pas l'écriture de *smart contracts* qui seraient déposés sur sa blockchain, mais une blockchain connectée à celle des bitcoins dénommée *rootstock* le permet. Les cryptomonnaies ripple, EOS, NEO, cardano autorisent aussi la création de *smart contracts*.

DES CRYPTOMONNAIES SANS PREUVE DE TRAVAIL

Les monnaies fonctionnant avec des « preuves de travail » pour récompenser ceux qui acceptent d'être des nœuds validateurs du réseau et contribuent à ce qu'il fonctionne ont deux graves défauts. Le premier est que leur fonctionnement et leur sécurité exigent une dépense continue et importante d'électricité. L'article publié en février 2018 dans cette rubrique « La folie électrique du bitcoin » (pp. 80-85) détaillait ce problème. Une mise à jour des chiffres de cet article donne comme conclusion qu'aujourd'hui la dépense annuelle électrique du réseau des bitcoins est supérieure à 40 térawattheures (TWh) d'électricité. C'est équivalent à ce que produisent en un an cinq réacteurs nucléaires ! Par comparaison, les *datacenters* de Google nécessitent moins de 6 TWh par an.

Le second grave défaut des cryptomonnaies utilisant des preuves de travail est que cela crée pour elles un handicap concurrentiel face aux monnaies cryptographiques n'utilisant pas les preuves de travail.

En effet, le fonctionnement d'un réseau de cryptomonnaies a un certain coût, qui d'une façon ou d'une autre doit être payé par les utilisateurs. Les émissions nouvelles d'unités monétaires créent une pression d'inflation et font perdre de la valeur aux unités déjà émises. Ce qui est une façon indirecte de faire payer

es utilisateurs). Même si les fortes variations du cours aujourd'hui masquent ce coût, il faudra le prendre en compte à moyen terme. Les commissions directement versées aux nœuds validateurs du réseau, ou d'autres systèmes encore, organisent ce paiement des utilisateurs vers les nœuds validateurs. Dans le cas des monnaies cryptographiques utilisant la preuve de travail, le coût des matériels de minage et de l'électricité sera ainsi payé par les utilisateurs. Ces sommes payées ne sont pas des bénéfices nets pour les nœuds validateurs, car ils doivent payer leur matériel et leur électricité. Aujourd'hui, après la baisse des cours du bitcoin, les nœuds validateurs perdent souvent en amortissement de leur matériel et en électricité plus de 90% de ce qu'ils gagnent : une cryptomonnaie à base de preuve de travail coûtera à terme beaucoup plus aux utilisateurs qu'une monnaie qui s'en passera.

Les autres systèmes les plus utilisés pour remplacer les preuves de travail sont les «preuves d'enjeu». Dans le système des preuves d'enjeu, les nœuds validateurs du réseau (parfois appelés *masternodes*) sont rémunérés en proportion des sommes qu'ils déposent et qui sont séquestrées par le réseau. Ce dépôt temporaire d'argent remplace l'investissement en matériel et la dépense en électricité des preuves de travail. Finalement, il ne coûte rien aux nœuds validateurs qui peuvent récupérer les sommes séquestrées (le protocole prévoit qu'à sa demande, celui qui a déposé l'agent puisse le retirer). Un nœud validateur sur une blockchain fonctionnant par preuve d'enjeu est moins coûteux qu'avec le système des preuves de travail.

Les cryptomonnaies fonctionnant avec ces preuves d'enjeu détiennent aujourd'hui plusieurs milliards de dollars et résistent aussi bien aux attaques que les cryptomonnaies fonctionnant par les preuves de travail. Un autre avantage de ces preuves d'enjeu est que le nombre de nœuds validateurs peut être limité, ce qui accélère le fonctionnement des échanges et conduit à une plus grande capacité en nombre de transactions par seconde.

D'autres systèmes n'entraînant pas la consommation démente des preuves de travail sont aussi utilisés, dont celui des «jetons brûlés» : pour utiliser les services de la blockchain, vous devez acheter des jetons et ils sont détruits quand vous utilisez ses services, ce qui est comparable au système des timbres-poste... utilisés depuis des siècles dans le monde entier.

L'un des plus graves défauts des cryptomonnaies est leur volatilité. Le cours du bitcoin est par exemple passé de 1000 dollars environ début 2017 à 20000 dollars en décembre 2017, avant de redescendre vers 1000 dollars actuellement. Il se peut que cela soit lié à la relative jeunesse de ces monnaies.

nais de nombreux experts considèrent que la volatilité est inévitable du fait de l'absence de régulation par une autorité émettrice. L'existence d'une contrepartie directe, quand par exemple une monnaie est adossée à l'or, ou indirecte quand elle est liée à un État qui s'en porte garant, est aussi évoquée comme facteur de stabilité des cours, dont les cryptomonnaies sont dépourvues.

DES CRYPTOMONNAIES PEU VOLATILES : LES STABLECOINS

D'où l'idée de créer et d'adosser une cryptomonnaie à une réserve de valeurs. Cela a été fait, donnant naissance à ce qu'on nomme des *stablecoins* («jetons stables»). La plus importante est tether, émise par la société Tether Unlimited qui assure que pour chaque unité ether émise, elle garde en réserve 1 dollar. Même si la réalité de cette contrepartie a parfois été mise en doute, elle semble suffisamment sérieuse pour que plus de 2 milliards de dollars circulent aujourd'hui sous forme de ethers. Une autre preuve de la confiance qui s'est établie à propos de cette cryptomonnaie stable est que le cours du tether est de 1,00 dollar (29 mars 2019) et que depuis plus d'un an, il est toujours resté entre 0,96 dollar et 1,03 dollar. L'année 2018 a été celle de ce nouveau type de cryptomonnaies qui se développera en 2019. Des systèmes d'audit scrupuleux assurent que ces contreparties annoncées sont réelles.

Le fait qu'une firme soit liée et garante de l'émission d'une telle cryptomonnaie s'oppose à l'idéal de décentralisation totale qui était l'une des motivations des créateurs du bitcoin. Cependant, l'échec relatif des monnaies cryptographiques classiques, dû notamment à la volatilité extrême de leur cours, et à la solidité des procédures de contrôle de la contrepartie qu'offrent les *stablecoins* suggèrent qu'elles vont prochainement jouer un rôle important dans cette période nouvelle de l'histoire des monnaies, commencée il y a dix ans avec les bitcoins.

Notons aussi qu'à part l'adossement à une réserve de valeur, un *stablecoin* tel que le tether est décentralisé pour le suivi des transactions et que des modèles de *stablecoins* totalement décentralisés sont expérimentés, qui, s'ils se révèlent satisfaisants, répondront aux attentes de ceux qui accordent de l'importance à la décentralisation totale.

La combinaison des *smart contracts* et des *stablecoins* est sur le point de créer le véritable départ d'un monde de monnaies numériques programmables pouvant circuler rapidement de manière sûre, irréversible, sans presque aucun coût de fonctionnement, sans dépense énergétique exagérée, éventuellement anonyme et dont les cours ne sont plus sujets aux folles variations du bitcoin et de ses émules.

BIBLIOGRAPHIE

J. Favier et al., **Bitcoin - Métamorphoses. De l'or des fous à l'or numérique ?** Dunod. 2018.

DPECST (Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques), **Les enjeux technologiques des blockchains**, 2018 : <http://www.senat.fr/rap/17-584/r17-5841.pdf>

J.-P. Landau et A. Genais, **Les crypto-monnaies**, rapport au ministre de l'Économie et des Finances, 11 juillet 2018 : <https://bit.ly/2UXAZon>

Article **Stablecoin** sur Wikipedia (consulté en février 2019) : <https://en.wikipedia.org/wiki/Stablecoin>

J.-P. Delahaye, **Consommation électrique des crypto-monnaies et des blockchains**, document pour la réunion de travail de la France-Stratégie sur « La consommation électrique des technologies disruptives » le 4 juin 2018 : <https://bit.ly/2FvENsE>

MATRONS



JOÏC MANGIN
rédacteur en chef adjoint
Pour la Science

LE COLIBRI, LES DENTS DE LA GUERRE

Le colibri jouit d'une image flatteuse dans le grand public. C'est pourtant un bagarreur, et son bec, parfois hérissé de «dents», a évolué en ce sens. Les Aztèques ne s'y étaient pas trompés et avaient fait de cet oiseau leur dieu de la guerre

S

ouvent richement coloré, admiré pour ses vols stationnaires, le colibri a bonne presse. Surtout depuis qu'il est devenu l'emblème d'un mouvement en faveur de la transition écologique dont le credo est une légende amérindienne: lors d'un incendie, un colibri tente d'éteindre le feu avec le peu d'eau qu'il peut transporter. Quand les autres animaux, terrifiés, questionnent son entêtement vain, il répond: «Je fais ma part.» Selon certains, à la fin de l'histoire, le colibri meurt d'épuisement, le feu sévissant toujours.

Cette bonne réputation n'est-elle pas usurpée? Probablement, et les Aztèques avaient une autre image du petit oiseau: ils avaient fait du colibri leur dieu de la guerre, sous le nom de Huitzilopochtli! Cette divinité est représentée dans de nombreux codex, et notamment celui de Florence: il s'agit de *L'Histoire générale des choses de la Nouvelle Espagne*, une encyclopédie du monde aztèque, établie par le franciscain Bernardino de Sahagún entre 1558 et 1577. Le manuscrit est conservé à la bibliothèque Laurentienne de Florence, en Italie.

Huitzilopochtli, également dieu du Soleil, était le patron de la ville de Tenochtitlán. Selon la légende, l'ancienne capitale aztèque (aujourd'hui devenue Mexico) fut fondée en un lieu indiqué par la divinité. À partir du xv^e siècle, celle-ci devint prédominante dans le panthéon aztèque, et on attribue à son culte le développement des sacrifices humains à grande échelle.

Huitzilopochtli (ici dans le codex florentin du xvi^e siècle), dieu aztèque de la guerre, était orné de plumes de colibri (en nahuatl, *Huitztzilin* signifie «oiseau-nouche»). Un bon choix: l'oiseau est agressif!





Huitzilopochtli est facile à reconnaître (voir ci-contre): il arbore des plumes de colibri, un bouclier souvent marqué des cinq directions spatiales (les quatre points cardinaux et le ciel) et un propulseur en forme de serpent. Cette arme, le «serpent de feu», est Xiuhtecuhtli, l'incarnation du dieu Xiuhtecuhtli.

Autant des armes et un bouclier semblent pertinents pour un dieu de la guerre, autant la symbolique du colibri peut surprendre. C'est que vous avez rarement observé des colibris... Ces oiseaux sont très agressifs, les mâles n'hésitant pas à s'attaquer violemment à coups de becs et à défendre leur territoire.

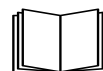
Avec des collègues, Alejandro Rico-Guevara, de l'université de Californie à Berkeley, a pris le temps de les étudier de près. Et ce qu'il a découvert remet en cause des idées reçues sur les colibris. On pensait que la forme de leur bec résultait d'une coévolution avec l'anatomie des fleurs, qui leur fournissent du nectar et qui sont ainsi nollinisées.

C'était négliger le penchant des oiseaux pour la rixe. De fait, l'examen attentif des becs montre qu'ils sont aussi adaptés au combat. Par exemple, certains sont hérissés de pointes semblables à des dents de requins. Et sur la représentation de Huitzilopochtli, on peut deviner de telles dents sur le masque que porte sur son dos le dieu. D'autres becs de colibris sont crochus. D'autres encore sont acérés comme des épées. De quoi voler dans les plumes, au sens propre, d'un rival!

Ces deux fonctions, boire et se battre, s'opposent et se traduisent par un compromis dans la morphologie des becs. C'est particulièrement vrai en Amérique tropicale, où la compétition pour la nourriture est rude. La forme des becs n'est donc pas uniquement façonnée pour l'alimentation. Autre découverte, les colibris ne comptent pas sur la seule capillarité pour aspirer le nectar: la langue, fourchue, jouerait également le rôle de pompe.

Chez les Aztèques, les colibris symbolisaient les âmes des guerriers tombés au combat. Même sous cette forme ailée, ils n'ont rien perdu de leur tempérament! ■

A. Rico-Guevara et al., *Integrative Organismal Biology*, vol. 1(1), article obv006, 2019.



L'auteur a publié:
**Pollock, Turner, Van Gogh
Vermeer et la science...**
Belin, 2018)

LES AUTEURS

JEAN-MICHEL COURTY et EDOUARD KIERLIK
Professeurs de physique à Sorbonne Université, à Paris

DES SALLES QUI RÉSONNENT

La bonne qualité acoustique d'une pièce nécessite un compromis entre la durée de réverbération, due aux échos successifs du son, et l'amplification sonore caractéristique des volumes clos.

Chaque fois que vous entrez dans un appartement vide, vous constatez qu'il résonne beaucoup plus que lorsqu'il est meublé, tandis que certaines pièces sont rapidement bruyantes dès que plusieurs personnes y entrent. Ces sensations sont dues à la réverbération de la pièce, due à la superposition des multiples échos des sons qui se réfléchissent sur ses parois. La forme de la pièce, la nature de ses parois et son contenu façonnent ces phénomènes acoustiques. Quels sont leurs rôles respectifs ?

DES SONS QUI RERONDISSENT

Pour simplifier, imaginons-nous postés dans un couloir qui canalise les sons dans le sens de la longueur. Si nous frappons nos mains, le son, très bref, va se propager jusqu'aux extrémités, s'y réfléchir et revenir vers nous, et ainsi de suite, en

effectuant des allers et retours. Si le couloir est très long, le premier écho qui nous revient est suffisamment séparé du claquement initial pour que nous puissions distinguer les deux sons. Tel est le cas si l'intervalle de temps dépasse un dixième de seconde, ce qui, compte tenu de la vitesse du son dans l'air, 340 mètres par seconde, nous oblige à être éloigné de plus de 17 mètres de l'extrémité du couloir.

Dans un couloir plus court, nous ne distinguerons pas le son du premier écho, ni la succession des autres échos réfléchis. Nous entendrons plutôt un son continu dont l'intensité décroît, à cause de l'amortissement des ondes sonores sur les parois : c'est la « réverbération ».

Pour caractériser ce phénomène, on utilise par convention la durée que met un son pour voir son intensité diminuer de 60 décibels (dB), c'est-à-dire d'un facteur dix million (10^6). C'est la différence entre un claxon et un chuchotement, ou entre

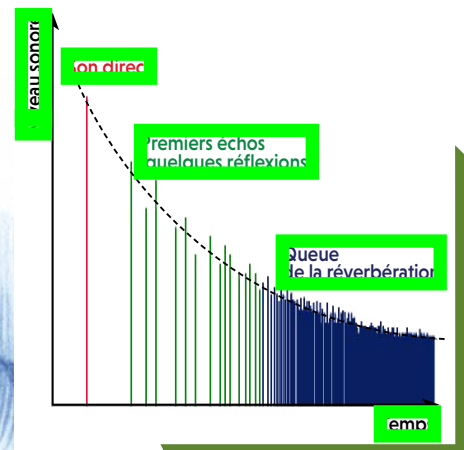
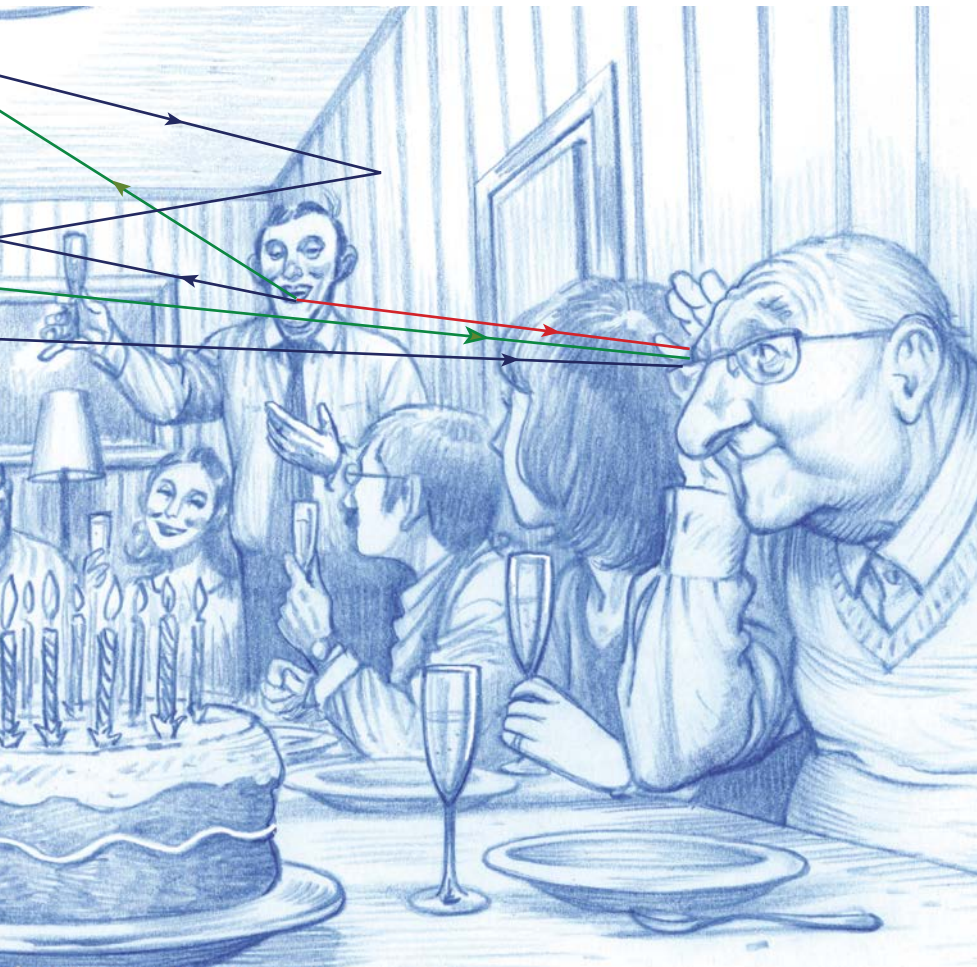


l'ambiance sonore d'une discothèque et celle d'une bibliothèque.

Dans le cas du béton lisse ou peint, ou encore du marbre, l'absorption de l'intensité sonore à chaque réflexion est de l'ordre de 1% (donc 99% de l'intensité est réfléchie). Il faut alors plus de 370 réflexions pour atteindre une réduction de 60 dB ; ce qui, pour un couloir de 10 mètres de long, fait un temps de réverbération de l'ordre de 40 secondes. Cette valeur est évidemment très surestimée, car les ondes sonores ne se réfléchissent pas uniquement sur les extrémités, mais aussi sur les murs latéraux. Elle suggère cependant une durée bien trop longue

LA REVERBERATION DU SON

Lorsqu'un son bref est émis dans une salle, l'auditeur présent entend non seulement le son initial, mais aussi ses échos successifs. Plus le nombre de réflexions qu'a subies un écho sur les murs et autres obstacles est élevé, plus il arrive tard à l'auditeur en premier, puis les échos correspondant à un petit nombre de réflexions (en vert), puis ceux correspondant à de nombreuses réflexions (en bleu). Lorsque l'intensité initiale a diminué d'un facteur 1 million (soit 60 décibels), on convient que la réverbération a pris fin, ce qui définit le temps de réverbération.



Un son se propage en général dans toutes les directions. Dans une salle, il donne lieu à toute une série d'échos, en fonction des réflexions subies sur les murs et autres surfaces.

Pour un bon confort auditif. L'allongement des sons ne permettant plus de les distinguer, les paroles deviennent inintelligibles et la musique se transforme en un vacarme confus.

LE VOLUME SONORE AUGMENTE

Faut-il donc tout faire pour réduire la réverbération? Ce serait oublier que celle-ci a un avantage: elle permet au son de s'accumuler, et donc d'augmenter le volume sonore. Au lieu de claquer les mains au milieu du couloir, allumons un haut-parleur qui émet cette fois un son continu. Au début, nous n'entendons que le son direct, puis vient se superposer le

premier retour: l'intensité sonore a doublé et on a gagné 3 dB. À mesure que nous parvenons les autres sons réfléchis, l'intensité continue de croître. C'est pour cette raison que l'on entend bien mieux une personne ou un musicien en intérieur qu'en extérieur.

Quel est le gain dû à cette réverbération? Comme l'intensité sonore s'atténue à chaque réflexion, on atteint au bout du temps de réverbération une valeur maximale. On montre que cette dernière est égale à l'intensité de la source divisée par le coefficient d'absorption. Avec des parois en béton, on aura ainsi un gain d'un facteur 100 (ou 10^2), soit de 20 dB.

La conception acoustique d'une salle suppose donc de trouver un compromis sur le temps de réverbération: assez court pour que le son entendu soit intelligible, mais aussi assez long pour bénéficier de l'effet d'amplification. En pratique, pour bien entendre des paroles, le temps de réverbération doit être inférieur à 0,8 seconde. En revanche, pour la musique, on peut accepter 1 à 2 secondes, et plus encore pour la musique d'orgue. On

Les auteurs ont récemment publié: **En avant la physique!**, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017)



comprend ainsi que les contraintes acoustiques d'une salle de théâtre diffèrent de celles d'une salle de concert, sans parler de l'opéra qui conjugue parole et musique...

Comment connaître le temps de réverbération pour une pièce de forme quelconque? Il faut d'abord estimer le parcours moyen entre deux réflexions du son sur les parois en tenant compte de tous les trajets possibles, y compris les réflexions multiples sur les murs. Chose remarquable, il existe une estimation simple dans le cas d'une salle parallélépipédique: le parcours moyen est égal à 1,6 fois le rapport entre le volume de la pièce et sa surface. Pour une pièce large de 3 mètres, longue de 4 mètres et haute de 2,5 mètres, on obtient environ 12 mètres, une valeur inférieure à toutes les dimensions de la pièce. La raison en est que les réflexions dominantes sont celles entre murs adjacents (au niveau des arêtes et des coins).

Il nous faut ensuite connaître comment le son est absorbé, car plus l'absorption est importante, plus le temps de réverbération est court. Or les moyens de moduler l'absorption sont nombreux.

CONTROLLER LA RÉVERBÉRATION EN MODULANT L'ABSORPTION

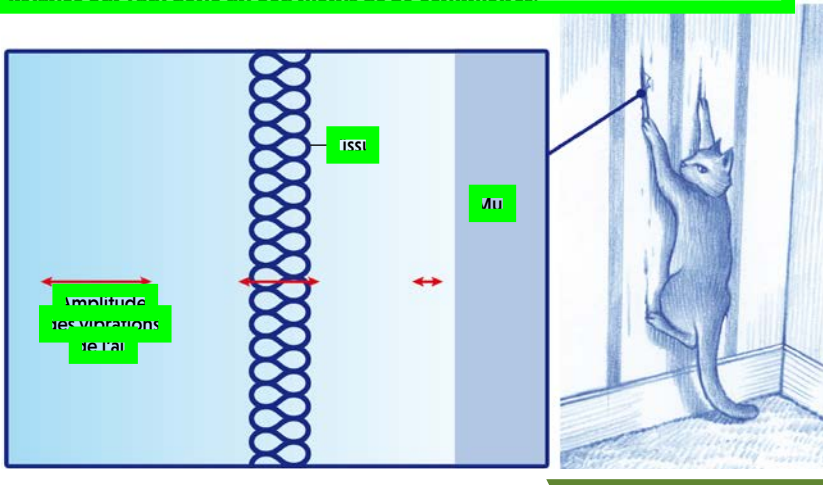
L'absorbant idéal (100%) est évidemment une ouverture – porte ou fenêtre ouverte – qui ne renvoie aucun son. Sinon, le son peut être partiellement transmis (et donc moins réfléchi) à travers des surfaces rigides. Par exemple, une vitre en verre transmet le son d'autant plus efficacement que celui-ci est grave: la transmission est de 35% à 150 hertz, 20% à 500 hertz (la tonalité du téléphone) et seulement 4% à 1000 hertz.

On peut aussi utiliser des matériaux poreux ou fibreux (moquette, tapis, plaque de liège...). D'une part, les oscillations de l'air provoquées par le passage de la vibration sonore s'amortissent dans les multiples petits canaux du matériau, par effet de viscosité (comme l'écoulement de l'eau dans un tuyau). D'autre part, une partie de l'énergie acoustique se transmet aux fibres, qui sont mises en mouvement. Toutefois, ces amortissements sont faibles si on colle le matériau à la paroi, qui est un nœud de vibration: les oscillations de l'air perpendiculairement à la surface y ayant une très faible amplitude, on a tout à gagner à écarter le matériau du mur (voir l'encadré ci-dessus). C'est flagrant avec les tissus et tentures suspendus: à 1 kilohertz, un rideau de velours absorbe près de 80% de l'intensité sonore.

DU TISSU MURAL BIEN POSE

Pour qu'un tissu mural absorbe bien les bruits, il faut laisser un espace entre lui et le mur, de l'ordre du centimètre. En effet, au niveau du mur, on a un nœud de vibration de l'air: les oscillations de l'air (doubles flèches, échelle exagérée).

Pour absorber de l'énergie sonore, un tissu mural (ou un rideau) doit se trouver là où les vibrations acoustiques sont notables. Pour une fréquence sonore de 440 hertz – la tonalité du téléphone –, l'amplitude des oscillations de l'air est maximale à une distance au mur égale au quart de la longueur d'onde du son, une distance qui vaut donc un peu moins de 20 centimètres.



Le plus souvent, une pièce a des parois de natures différentes sur le plan acoustique. On caractérise alors chaque surface par sa surface équivalente de fenêtre ouverte, obtenue en multipliant l'aire considérée par le coefficient d'absorption. L'unité utilisée est le sabin, du nom du physicien américain Wallace Sabine qui, en 1898, a trouvé une très bonne approximation du temps de réverbération.

La probabilité moyenne d'absorption d'un son est alors le rapport entre la surface équivalente d'absorption et la surface totale des parois de la pièce. On calcule ensuite le temps de réverbération à partir du parcours moyen du son et de la probabilité moyenne d'absorption. *In fine*, il ne reste, dans la formule de Sabine donnant le temps de réverbération, que le rapport entre le volume de la pièce sur la surface absorbante, le tout multiplié par un coefficient numérique qui vaut environ 0,16.

Pour la salle parallélépipédique évoquée plus haut, le temps de réverbération avec des murs en béton est de 8 secondes. Avec de la moquette et du liège sur les murs, ce temps est divisé par 20, ce qui donne 0,4 seconde, une valeur tout à fait acceptable. En pratique, la présence de mobilier ou de spectateurs pour les salles de concerts change aussi considérablement les choses, et il faut prendre cela en compte pour estimer avec précision les propriétés acoustiques de la salle. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Keepports, **Simple echoes and subtle reverberations**, *Physics Education*, vol. 45(2), pp. 190-195. 2010

I. G. Leventhall, **The acoustics of rooms**, *Physics Education*, vol. 2(2), pp. 101-106. 1967

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

CITEO

Le nouveau nom d'Eco-Emballages et Ecofolio

MAINTIEN



HERVE LE GUYADER
professeur émérite de biologie
évolutive à Sorbonne
Université, à Paris

COMMENT UNE BLATTE DEVIENT ZOMBIE

Deux piqûres de la guêpe émeraude suffisent à transformer une blatte américaine en un garde-manger docile pour une de ses larves. Son secret? Un cocktail venimeux qui attaque les neurones de la blatte sur tous les fronts...

Une fourmi qui grimpe au sommet des brins d'herbe et finit dans l'estomac d'un mouton; un rat qui ne fuit pas devant un chat et se laisse dévorer; une coccinelle qui couve le cocon d'une guêpe...

Il cache toujours un parasite, qui optimise la dispersion de sa descendance en infestant un animal et en le manipulant. La biologie évolutive s'est saisie de ce phénomène fascinant et a montré qu'il s'établit sous la pression de la sélection naturelle. Par exemple, des expériences ont montré que les cocons de guêpes braconides (*Dinocampus coccinellae*) protégés par des coccinelles maculées (*Coleomegilla maculata*) vivantes sont moins soumis à la prédation que ceux laissés seuls ou recouverts d'une coccinelle morte.

Toutefois, jusqu'à récemment, on ne savait pas expliquer comment le parasite agit sur la physiologie de l'hôte. Certes, en 2015, Nolwenn Dheilly, alors à l'université de Perpignan, et ses collègues ont résolu une part du mystère dans le cas de la coccinelle: ils ont montré que la guêpe *D. coccinellae* agit sur sa proie en lui transmettant un virus qui bloque sa réponse immunitaire antivirale et se multiplie dans ses ganglions nerveux, mais le

scénario reste à préciser. En revanche, une étude récente du venin de la guêpe émeraude (*Ampulex compressa*) vient d'établir avec précision ce qui se passe dans le système nerveux de son hôte, la blatte américaine (*Periplaneta americana*).

LA GUEPE PREND LES COMMANDES

La guêpe émeraude est un hyménoptère dit parasitoïde: elle ne parasite son hôte que durant une partie de sa vie, la phase larvaire. La guêpe femelle fécondée attaque la blatte qui, d'ailleurs, ne se laisse pas faire et tente de la repousser. Deux piqûres venimeuses lui suffisent à transformer sa victime en une proie passive pour une de ses larves. La première piqûre, effectuée dans le ganglion nerveux du premier segment thoracique de la blatte, induit la paralysie de sa première paire de pattes pendant quelques minutes. La guêpe en profite pour lui infliger une deuxième piqûre très précise dans deux ganglions nerveux céphaliques, le cerveau proprement dit et le ganglion sous-œsophagien (voir l'encadré page 94). La blatte commence alors un comportement de toilette intense qui dure une trentaine de minutes. Pendant ce temps, la guêpe apprête le terrier qu'elle a déjà creusé non loin du lieu de l'attaque.

Puis la blatte présente un comportement étonnant, appelé hypokinésie. Alors que la plupart des autres insectes parasitoïdes paralysent simplement leurs proies, le venin de la guêpe émeraude modifie spécifiquement le comportement de fuite et le marche spontanée, toutes les autres fonctions motrices – marche, nage, prise de nourriture – restant intactes: la blatte hypokinésique marche si elle est tirée, nage si on la pousse dans l'eau... La guêpe peut ainsi tranquillement mener sa proie vers son terrier, pondre un œuf sur le fémur d'une patte et fermer le terrier avec les graviers et des feuilles.

La larve éclôt dans les trois jours et se nourrit de l'hémolymph de la blatte en mordant l'articulation de la base de la patte, où la cuticule est souple. La salive de la larve contient un impressionnant cocktail de molécules antimicrobiennes qui préservent l'intégrité de la blatte. Après deux mues, à la fin du deuxième stade larvaire, la larve pénètre dans la cavité corporelle de la blatte, où elle mange en priorité le tissu adipeux et les muscles, laissant de côté les organes vitaux comme l'intestin et les tubes de Malpighi, l'analogue des reins chez les insectes.

La blatte survit ainsi jusqu'à la fin du troisième stade larvaire, environ huit jours après l'éclosion. La larve engage



guêpe émeraude
Ampulex compressa
longueur: 2,2 cm



blatte américaine
Periplaneta americana
longueur: 4 cm

EN CHIFFRES

200

La faune des Amériques est riche en guêpes à cafards, dont fait partie la guêpe émeraude *Ampulex compressa*, compte actuellement environ 200 espèces, qui vivent principalement sous les tropiques. Toutes utilisent des blattes pour nourrir leurs larves.

264

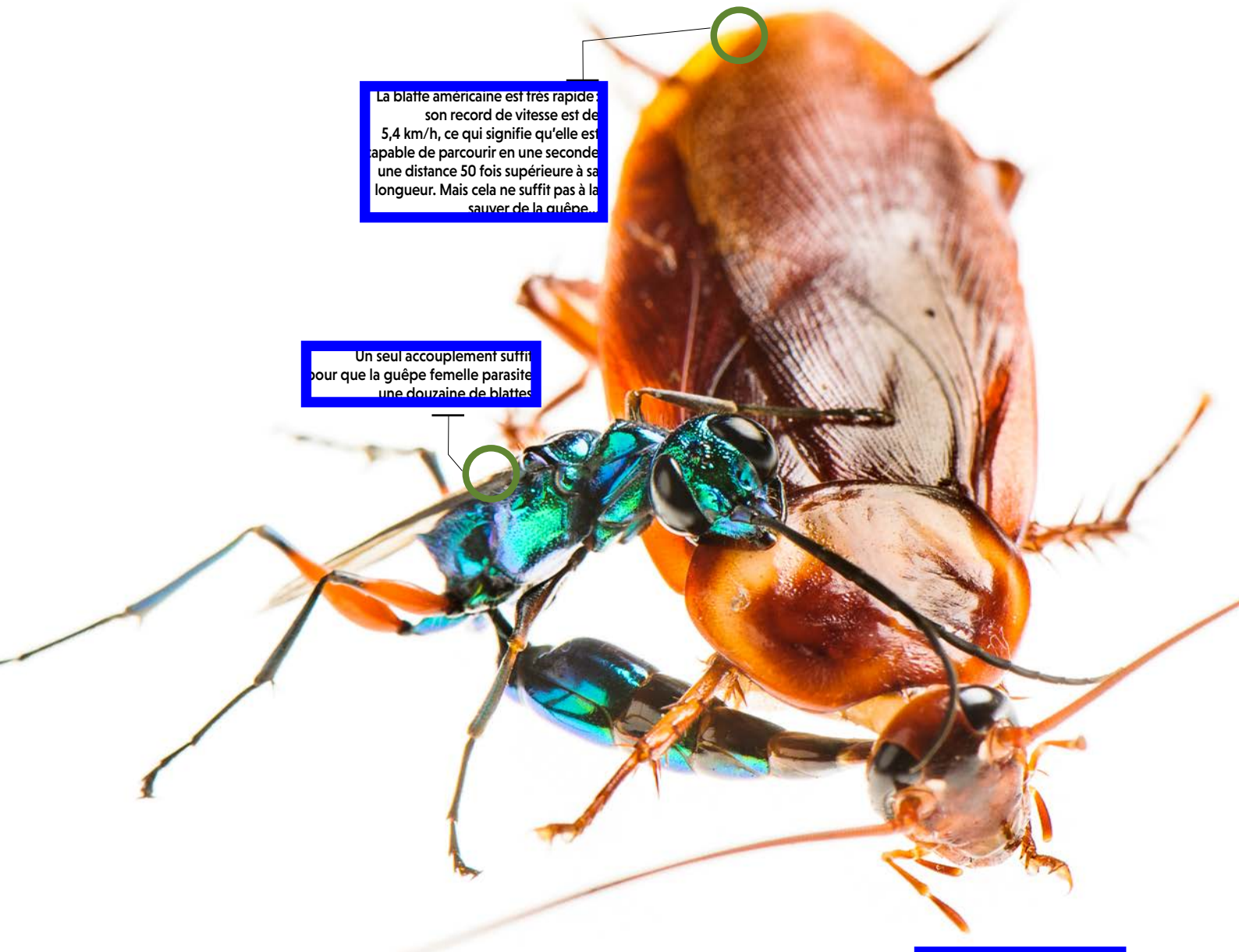
Le venin de la guêpe émeraude contient 264 protéines différentes.

50 %

On estime qu'au moins 50 % des espèces animales et végétales sont des parasites à certains stades de leur cycle de vie. Le groupe des guêpes parasitoïdes compte à lui seul plus de 100 000 espèces. Il existerait depuis longtemps : en 2018, une équipe allemande a identifié quatre espèces de telles guêpes dans des fossiles de pupes de mouches vieux de 34 à 40 millions d'années.

La blatte américaine est très rapide : son record de vitesse est de 5,4 km/h, ce qui signifie qu'elle est capable de parcourir en une seconde une distance 50 fois supérieure à sa longueur. Mais cela ne suffit pas à la sauver de la guêpe...

Un seul accouplement suffit pour que la guêpe femelle parasite une douzaine de blattes.



lors la pupaison (sa transformation en nymphe), qui dure quatre semaines, puis l'adulte émerge et la vie libre de l'insecte véritable commence.

L'originalité de ce comportement est telle que différents laboratoires s'y sont intéressés. Les études ont permis de décoder une particularité insoupçonnée : l'hypokinésie est réversible et, si aucun œuf n'est déposé, le comportement de fuite est récupéré au bout d'une semaine, ce qui d'ailleurs correspond au temps nécessaire à la larve pour envahir le corps de la blatte. On remarque alors que la piqûre n'a d'effet ni létal ni nécrotique, l'animal ne présentant aucune séquelle après un tel traitement.

DANS LE VENIN DE LA GUEPPE

En 2018, l'équipe de Michael Adams, de l'université de Californie à Riverside, s'est lancée dans une étude biochimique fine du venin. On savait déjà que la première piqûre entraînant la paralysie de la première paire de pattes injectait en quantité de l'acide γ -aminobutyrique (GABA), un neurotransmetteur (un messager moléculaire entre neurones) connu pour inhiber le système nerveux central chez les mammifères et les oiseaux. Maintenant, on connaît le cocktail de la seconde piqûre.

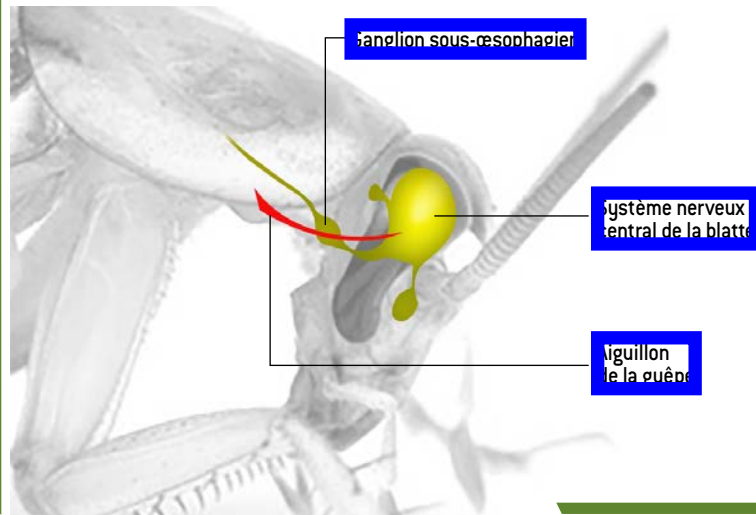
D'abord, la réaction de toilettage initiale semble due à de la dopamine, un autre neurotransmetteur : injectée seule à la blatte, cette molécule déclenche la même réaction. Par ailleurs, quatre neuropeptides nommés ampulexines ont été mis en évidence. Injectés à la blatte, ils entraînent la perte du réflexe de fuite. Il en est de même d'autres neuropeptides détectés dans le cocktail, les tachykinines.

Une quantité d'enzymes de dégradation se retrouvent également dans le venin, comme des protéases qui altèrent la réponse immunitaire innée de la blatte, ou des hyaluronidases, qui hydrolysent les sucres complexes, constituants majeurs de la matrice extracellulaire. Enfin, des protéines d'adhésion cellulaire et des Rho-GTPases, des enzymes impliquées dans la régulation de la dynamique du cytosquelette d'actine, sont aussi abondantes dans le cocktail.

Tout cela permet de proposer un modèle intégré d'action du venin sur les ganglions nerveux de la blatte. Les neuropeptides agissent immédiatement sur le comportement de l'insecte. Puis des enzymes dégradent la matrice extracellulaire des neurones, en particulier au niveau des synapses, les zones de communication entre neurones. De plus, les

LA GUEPPE EMERAUDE FAIT DE LA MICROCHIRURGIE

Frédéric Libersat, de l'université Ben-Gourion, en Israël, s'est demandé comment la guêpe pouvait faire une piqûre aussi précise. Il a fourni à des guêpes des blattes dont certaines avaient une partie de leur système nerveux central lésé. Il a alors mesuré le temps que mettait la guêpe à pratiquer sa piqûre. Quel que soit l'état de l'animal, la première piqûre dure le même temps, soit environ 15 secondes. La deuxième piqûre, plus longue, habituellement de l'ordre de 40 secondes, dure un temps considérable lorsque le ganglion sous-œsophagien a été enlevé, de l'ordre de 3 minutes ! En fait, la guêpe possède des terminaisons sensorielles à l'extrémité de son aiguillon et cherche les ganglions pour les cibler avec précision.



protéines d'adhésion cellulaire s'intercalent dans l'espace intersynaptique, perturbant leur fonctionnement. Les Rho-GTPases induisent par ailleurs le désassemblage du cytosquelette d'actine, ce qui entraîne une rétraction des prolongements nerveux et perturbe deux processus indispensables à la transmission de l'influx nerveux, l'exocytose et l'endocytose. Ces deux processus par lesquels les cellules respectivement sécrètent et ingèrent des molécules sont en effet dépendants de l'actine.

L'efficacité synaptique est donc anéantie, ce qui explique la disparition des comportements de fuite et de marche spontanée. Et comme toutes ces molécules ont des durées de vie assez courtes, on comprend que le mécanisme soit réversible. Ainsi, la manipulation de l'hôte par le parasitoïde correspond à une intoxication chimique du système nerveux central dont tous les paramètres commencent à être décodés. Reste maintenant à reconstruire l'histoire évolutive du venin. Quels processus de sélection ont abouti à un tel cocktail de protéines, dont certaines redondantes ? La réponse devrait être bien plus passionnante qu'une simple optimisation... ■



Hervé Le Guyader a récemment publié : *L'Aventure de la biodiversité*, Belin, 2018.

BIBLIOGRAPHIE

X. Arvidson et al., Parasitoid jewel wasp mounts multi-pronged neurochemical attack to hijack a host brain, *Mol. Cell. Proteomics*, vol. 10(1), pp. 99-114, 2019.

M. Kaiser et al., Molecular cross-talk in a unique parasitoid manipulation strategy, *Insect Biochem. Mol. Biol.*, vol. 106, pp. 64-78, 2019.

X. Gal et F. Libersat, A wasp manipulates neuronal activity in the sub-oesophageal ganglion to decrease the drive for walking in its cockroach prey, *PloS One*, vol. 5(4), article e10019, 2010.

OFFRE D'ABONNEMENT

1 AN

ABONNEZ-VOUS À
POUR LA
SCIENCE3 FORMULES
À CHOISIR

	FORMULE DÉCOUVERTE	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 à 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	59€ Avec une réduction de 82% (0€)	79€ Avec une réduction de 114% (40€)	99€ Avec une réduction de 174% (10€)
	29 %	31 %	43 %

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Pour la Science – Service abonnements – 19 rue de l'Industrie – BP 90055 – 67402 Illkirch Cedex – email : pourlascience@abopress.fr

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

Je choisis ma formule (merci de cocher)

☐	FORMULE DÉCOUVERTE	59€ 82.86€
☐	FORMULE PAPIER HORS SÉRIE	79€ 114.40€
☐	FORMULE INTÉGRALE	99€ 174.40€

12 n° du magazine papier
4 Hors-série papier
Accès illimité aux contenus en ligne

2/ l'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 : Signature obligatoire :

réduction 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 enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/12/2019 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, de 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.

MAUVREUX



HERVÉ THIS
physicochimiste,
directeur du Centre
international de
gastronomie moléculaire
à ParisTech-Inra, à Paris

QUATRE GOÛTS SUCCESSIFS ET PLUS

Conférer de la «longueur en bouche» à des mets, comme pour les vins? Il suffit d'organiser chronologiquement la libération dans la bouche des différents composés sapides et odorants.

Les gourmets le savent: la longueur en bouche est une qualité des vins qui se mesure en «caudales», ou secondes durant lesquelles une sensation persiste, après la mise en bouche d'une gorgée. Médiocre mesure.

que la sensation évolue, mais qui a le mérite de reconnaître les décours de la dégustation. Pour les préparations culinaires, en revanche, on peut s'étonner que rien n'ait été classiquement évoqué alors que, là aussi, le gourmand rêve de faire durer le plaisir.

Passons en cuisine, où les livres sont silencieux à ce propos, où les manuels ne lisent rien de l'attaque (les premières sensations que l'on a quand on prend une bouchée) ni des sensations suivantes. Comment organiser la construction des mets en vue de maîtriser ces sensations et, surtout, de les faire durer? Ce mois-ci, je propose une recette avec quatre goûts successifs... mais on pourrait faire mieux.

Commençons par observer qu'un liquide vient immédiatement se disperser dans la bouche et libérer les composés sapides (les composés solubles dans l'eau qui donnent la saveur) dans la salive, tandis que les composés odorants sont rapidement évaporés et montent vers le nez par les fosses rétronasales, à l'arrière de la bouche. C'est une manière simple d'avoir une attaque, même si l'on se souvient qu'il y a bien plus de possibilités: pensons aux vins qui ont de la longueur en bouche, voire qui «font la queue de paon» (c'est-à-dire donnant des vagues de sensations successives).

Imaginons maintenant qu'un élément solide soit trempé dans la sauce liquide, dont il sera tapissé. Cette fois, le liquide périphérique donnera la première sensation, mais la mastication du solide libérera ensuite, bien après, les composés sapides et odorants de ce solide, créant

En dégustant ces bonbons aux noisettes saupoudrés de noix de coco râpée, on ressent en bouche une succession de trois goûts (et consistances) différents.



une seconde vague de goûts.

Pouvons-nous faire mieux? Certainement, car il y a solide et solide. Les gels, dont la cuisine est coutumière, sont des solides qui libèrent très facilement les liquides dont ils sont constitués. Par exemple, fouettons de l'huile (une huile qui n'aurait du goût!) dans une solution aqueuse où nous avons dissous de la gélatine; nous obtenons une émulsion qui, en refroidissant, gélifie, formant ce que j'avais nommé un «liebig». Et c'est ainsi que si nous plongeons un solide plus dur dans cette émulsion, avant la gélification, puis que nous trempions l'ensemble dans une sauce liquide, après que la gélification a lieu, nous obtenons trois couches: le solide, le liebig et le liquide. En bouche, la libération des goûts se fera dans l'ordre inverse.

DANS L'ORDRE: SOLIDE VITRIFIÉ, SOLIDE, LIEBIG ET LIQUIDE

Trois vagues sur mesure, ce n'est pas si mal, mais quatre? Il faut maintenant recourir à un système qui laisse diffuser les composés encore plus lentement. Au cœur du solide précédent, mettons un solide vitrifié qui, lui, ne libérera que très lentement, après force mastications, les composés qu'il renferme, et le tour sera joué. En pratique, les cuisiniers savent préparer de nombreux systèmes vitrifiés, soit à partir de farine, soit à partir de

sucres (le caramel), mais les possibilités sont nombreuses, notamment si l'on fait sécher une solution contenant des polymères, telles les protéines, comme on s'en aperçoit facilement si on laisse sécher un blanc d'œuf (solution de 10% de protéines dans 90% d'eau): on récupère un verre jaune.

Pourquoi ne pas introduire de telles idées dans les lycées hôteliers?



RECETTE

BOUCHÉES DURETÉ VITRIFIÉE

- 1 Dissoudre 20 % de poudre de blanc d'œuf dans du vin salé et poivré, et laisser sécher au four très doux.
- 2 Quand ce verre est obtenu, en préparer des éclats, et les mêler à de la viande hachée.
- 3 Cuire très rapidement de petites boulettes de cette mêlée au four à micro-ondes.
- 4 Chauffer un fond de viande avec de la gélatine.
- 5 Quand la gélatine est fondue, y verser, en fouettant, du beurre fondu.
- 6 Tremper les boulettes dans cette émulsion, puis les poser sur une grille pour qu'elles s'effroidissent; au choix, plonger une seconde fois dans l'émulsion non prise afin d'obtenir une couche de «liebig» plus épaisse.
- 7 Réduire du vin au miroir, l'assaisonner, ajouter un peu de fond de veau corsé, et tremper les boulettes dans cette sauce.

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

**COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION
DÈS MAINTENANT !**



N° 498 (avr. 19)
éf. PI.498



N° 497 (mar. 19)
éf. PI.497



N° 496 (févr. 19)
éf. PI.496



N° 495 (jan. 19)
éf. PI.495



N° 494 (déc. 18)
éf. PI.494



N° 493 (nov. 18)
éf. PI.493



N° 492 (oct. 18)
éf. PI.492



N° 491 (sept. 18)
éf. PI.491



N° 490 (août 18)
éf. PI.490



N° 489 (juillet 18)
éf. PI.489



N° 488 (juin 18)
éf. PI.488



N° 487 (mai 18)
éf. PI.487

A retourner accompagné de votre règlement à :

Montparnasse Science - Service VPC - 170 bis, boulevard du Montparnasse - CS20012 - 75680 Paris
Tél : 01 47 33 11 11 - Email : montparnasse@montparnasse.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} ref.		2 ^e	9.90 € =		€
2 ^e ref.			9.90 € =		€
3 ^e ref.			9.90 € =		€
4 ^e ref.			9.90 € =		€
5 ^e ref.			9.90 € =		€
6 ^e ref.			9.90 € =		€

TOTAL À RÉGLER _____ €

Groupe Pour la Science - Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris
Tél : 01 47 33 11 11 - Email : montparnasse@montparnasse.fr

Le présent bulletin est valable jusqu'au 31/12/2019 en France métropolitaine uniquement. Pour l'export, rendez-vous sur notre site internet boutique.montparnasse.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 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 email à l'adresse : protection-donnees@montparnasse.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

www.montparnasse.fr

PICORER



Retrouvez tous
nos articles sur
www.pourlascience.fr

P.86

72 MILLIARDS

C'est la capitalisation totale en dollars du bitcoin, au 29 mars 2019. A cette date, douze monnaies cryptographiques dépassaient une capitalisation de 1 milliard de dollars.

P.48

SAPAJOUS

Les singes sapaïous à barbe utilisent des pierres pour casser des noix et des fruits, mais aussi pour creuser le sol à la recherche d'araignées fousseuses ou de racines. On a retrouvé des outils de sapajous datant de 2 400 à 3 000 ans.

P.26

« Chaque année, 100 000 Français contourneraient la loi en achetant des tests génétiques d'ancestralité aux États-Unis, en Grande-Bretagne ou en Suisse »

GUILLAUME DE MORAN

P.92

264

La quène émeraude prend le contrôle d'une blatte en lui injectant dans le système nerveux un venin contenant 264 protéines différentes. La blatte devient alors le garde-manger de sa larve.



LABIODENTALES

L'agriculture aurait favorisé l'utilisation des consonnes labiodentales comme « f » et « v ». Elle est associée à une nourriture plus molle qui aurait diminué l'usure des dents, ce qui aurait facilité la prononciation de ces consonnes.

P.56

CHANT DE DUNE

Sur certaines grandes dunes de sable, la couche de grains qui s'écoule fait vibrer l'air, ce qui produit un son grave proche d'un bourdonnement. Ce phénomène, déjà décrit par Marco Polo, n'a été compris que dans les années 2000.

P.22

50 %

D'après un sondage Ifop paru en 2017, 50 % des Français ne connaissent pas bien la notion d'antibiorésistance et n'ont pas conscience qu'il s'agit d'un problème de santé publique grave et mondial.

cité

sciences
et industrie

À l'occasion de la sortie de son numéro 500, le magazine *Pour la Science* convie le physicien et philosophe Étienne Klein et ses invités à venir partager avec le public quelques éléments de réflexion autour des défis contemporains de la mécanique quantique.

Avec Étienne Klein, physicien et philosophe des sciences; Bruce Benamran, créateur de la chaîne Youtube «e-penser»; Gérard Berry, informaticien, professeur au Collège de France et membre de l'Académie des sciences; Nathalie Besson, physicienne des particules, CEA.

Séance animée par Cécile Lestienne, directrice des rédactions de *Pour la Science* et *Cerveau & Psycho*.

Dessins en direct par Lison Bernet.

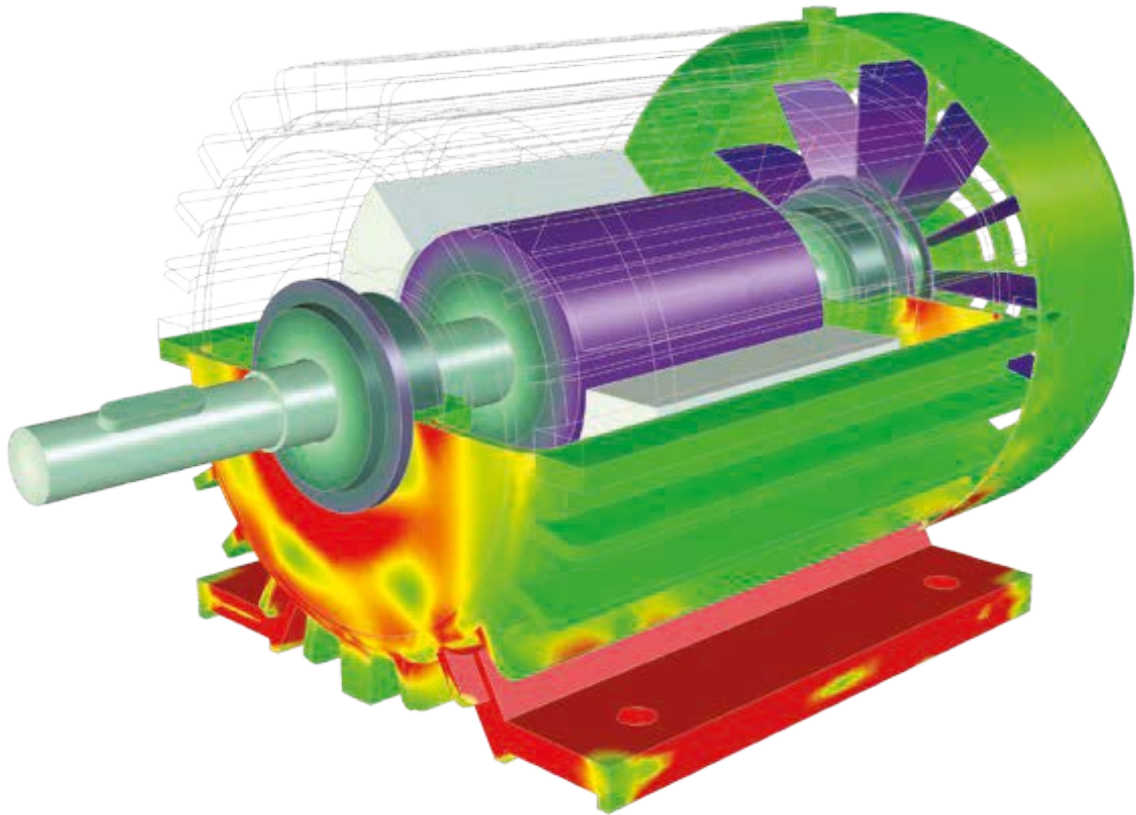
balade dans le monde de la physique quantique

table ronde

— jeudi 6 juin à 18h30



Inventé au 19^{ième} 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