



JUILLET 2019
N° 501

Anniversaire

Dossier

Apollo 11
1969 - 2019

CLIMATOLOGIE
**LA PÊCHE AUX
CRÊPES DE GLACE
DE L'ANTARCTIQUE**

BIOLOGIE
**CONFLITS
SEXUELS CHEZ
LES DYTQUES**

La foule en équations

Des manifestations aux réseaux sociaux

L'Observatoire de Paris propose deux Diplômes d'Université.

LUMIÈRES SUR L'UNIVERS

Formation en ligne en astrophysique - Niveau (L1-M1) - Diplômante

- Cours et nombreux exercices interactifs - **Tutorat personnel individualisé** assuré par des **astrophysiciens professionnels**.
- Ouvert à tous (niveau bac minimum) : passionnés, animateurs, étudiants...
- Validation possible sous forme d'un Diplôme d'Université ou de Crédits de Licence ou de Master (ECTS)

Des parcours spécialisés adaptés à tous

Des étoiles aux planètes : **niveau L1-L2**

Cosmologie et Astrophysique extragalactique : **niveau L2**

Mécanique Céleste : **niveau L3**

Fondamentaux pour l'astronomie et l'astrophysique : **niveau L3**

Sciences Planétaires : **niveau L3**

Fenêtres Sur l'Univers : **niveau M1**

Instrumentation, chaîne de mesure et projets : **niveau M1**

Inscriptions 2019 - 2020 ouvertes jusqu'au 7 Septembre 2019 :

https://ufe.obspm.fr/candidatures_ufe

Contenus visibles ici : <https://media4.obspm.fr/portail/>

contact.dulu@obspm.fr



EXPLORER ET COMPRENDRE L'UNIVERS

Formation en présentiel ou à distance en vidéo, Diplômante

Objectifs

Acquérir un panorama des connaissances actuelles et des recherches en cours en astronomie et en astrophysique auprès d'astronomes professionnels.

Contenu

Cours le mardi soir de 17h à 20h à Paris : Mécanique Céleste, Ondes et instruments, Histoire, Soleil, Planétologie comparée, Traitement de données, Etoiles et milieu interstellaire, Galaxies, Cosmologie, Epistémologie.

Ces cours peuvent être suivis en présentiel ou à distance en vidéo (en direct ou en différé).

Un stage de travaux pratiques est proposé en mars à l'Observatoire de Meudon (en option ; nombre de places limitées).

Un stage d'observation de 4 nuits est proposé à l'Observatoire de Haute Provence en été (en option réservé en présentiel ; nombre de places limitées).



Publics concernés

Cette formation s'adresse à toutes les personnes passionnées d'astronomie et de niveau baccalauréat scientifique ou équivalent.

Inscriptions

Dossiers à déposer avant le 7 septembre sur le site d'inscription en ligne :

https://ufe.obspm.fr/candidatures_ufe

Renseignements

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

contact.duecu@obspm.fr - Tél. : 01.45.07.78.87

POUR LA SCIENCE

www.pourlascience.fr

170 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

Stagiaire: Izia Pétilon

HORS-SÉRIE POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef adjoint: Loïc Mangin

Développement numérique: Philippe Ribeau-Gésippe

Community manager: Aëla Keryhuël

Conception graphique: William Londiche

Directrice artistique: Céline Lapert

Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel,

Ingrid Leroy, Patrick Cocœur, Assya Monnet (stagiaire)

Revisseuse: Anne-Rozenn Jouble

Marketing & diffusion: Arthur Peys

Chef de produit: Charline Buché

Direction du personnel: Olivia Le Prévost

Direction financière: Cécile André

Fabrication: Marianne Sigogne et Olivier Lacam

Directeur de la publication et gérant: Frédéric Mériot

Anciens directeurs de la rédaction: Françoise Pétry

et Philippe Boulanger

Conseiller scientifique: Hervé This

Ont également participé à ce numéro:

Serge Berthier, Maud Bruguière, Fanny de Busseroles,
Antoine Chambert-Loir, Benoît Côté, Laurent Debarbieux,
Chantal Ducoux, François Forget, Aline Gertsner,
François Képès, Florian Moreau, Mathieu Laneuville,
Romain Tavernier

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

Taux de fibres recyclées: 30 %

«Eutrophisation» ou «Impact

sur l'eau»: P_{tot} 0,007 kg/tonne



Certifié PEFC

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

10-31-1282

pefc-france.org

E DITO



**MAURICE
MASHAAL**
Rédacteur
en chef

COMPRENDRE LES FOULES... POUR LES PROTÉGER!

Quand vous marchez sur le trottoir et que vous devez éviter la collision avec des piétons venant en sens inverse, avez-vous tendance à dévier vers la droite ou vers la gauche? Dans un groupe dense en mouvement, des individus plus rapides que les autres accélèrent-ils ou freinent-ils l'ensemble? Comment concevoir les issues de secours d'une salle de spectacle pour que celle-ci puisse être évacuée au plus vite? Telles sont quelques-unes des questions auxquelles s'intéresse la science des foules, et *Pour la Science* vous propose à la une de ce numéro deux articles pour vous initier à ce domaine de recherche pluridisciplinaire et en plein essor (voir pages 26 à 39).

L'intérêt de comprendre le comportement d'une foule n'est pas qu'académique, loin de là. Les mouvements d'une assemblée dense d'individus conduisent parfois à des événements dramatiques, comme cela fut le cas en 2015 au pèlerinage de La Mecque, où une bousculade fit près de 2500 morts. Or modéliser de façon fiable les mouvements de foule est impératif pour éviter de telles catastrophes ou les atténuer.

Par ailleurs, une foule ne se manifeste pas forcément par des mouvements: elle peut présenter des phénomènes de contagion, et c'est ce qui se produit par exemple avec les «réseaux sociaux» (mais asociaux par certains aspects...) où, bien souvent, les fausses nouvelles se propagent davantage et plus vite que les vraies.

La compréhension des foules aide à protéger leur intégrité physique, et devrait aider à protéger leur intégrité mentale. Reste que le savoir acquis sur les comportements de masse peut, comme tout savoir, servir aussi des causes beaucoup moins nobles... en tombant dans les mains d'une grande entreprise, d'une secte, d'une agence de publicité, d'un parti politique ou d'un État autoritaire, comme la Chine, qui organise une surveillance de masse par reconnaissance faciale. Si les foules en prennent conscience, peut-être modifieront-elles leur attitude de façon à contrecarrer les mainmises délétères? ■

SOMMAIRE

N° 501 /
Juillet 2019

ACTUALITÉS

P. 6

ECHOS DES LABOS

- Le génome d'*Escherichia coli* complètement recodé
- Un trésor bourguignon de la fin du xv^e siècle
- Comment Pluton préserve un océan liquide
- L'origine des structures rayonnées d'impact
- Des éléments mobiles de notre génome pris sur le vif
- Supernoir: l'atout séduction des araignées-paons
- Explosion en jets des premières étoiles?
- L'hypothèse de Riemann vacille mais ne tombe pas

P. 18

LES LIVRES DU MOIS

P. 20

AGENDA

P. 22

HOMO SAPIENS INFORMATICS

Exigence stimulante ou excessive
Gilles Dowek

P. 24

QUESTIONS DE CONFIANCE

Tentative d'épuisement d'un risque
Virginie Tournay

GRANDS FORMATS

DOSSIER - LES 50 ANS D'APOLLO 11

Le 21 juillet 1969 à 2h56 (heure française), des hommes ont foulé pour la première fois le sol de la Lune. Retour sur le programme *Apollo* et ses succès, et aperçu des projets actuels.



P. 40

PORTFOLIO

UN PETIT PAS QUI A 50 ANS

Clara Moskowitz

L'exploit de la mission *Apollo 11* en quelques images.

P. 52

CONQUÊTE SPATIALE

LA RUÉE VERS LA LUNE

Adam Mann

Une nouvelle course vers notre satellite naturel est sur le point de commencer.



P. 46

CONQUÊTE SPATIALE

SUR LES TRACES D'APOLLO 11

Edward Bell

Un nouvel aperçu de la mission *Apollo 11* grâce à des images satellites et des modélisations 3D récentes.

P. 58

PLANÉTOLOGIE

LE PRÉCIEUX BUTIN D'APOLLO

Erica Jawin

L'étude des roches lunaires a radicalement renouvelé la planétologie.

P. 50

INFOGRAPHIE

OBJECTIFS LUNE

Parmi les 122 missions qui ont visé la Lune, à peine plus de la moitié ont atteint leur objectif.



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 :
© Shutterstock.com/adike

Les portraits des contributeurs
sont de Seb Jarnot



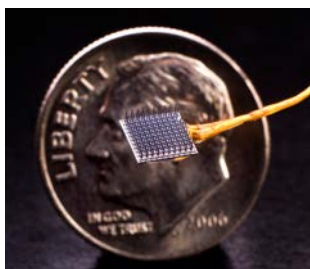
P.66

CLIMATOLOGIE

LA PÊCHE À LA CRÊPE DE GLACE

Fleurianne Bertrand
et Tim Ricken

Dans l'océan Antarctique, des chercheurs sont partis « pêcher » des crêpes de glace. Leur objectif: mesurer leurs propriétés pour les intégrer de façon plus réaliste dans les modèles climatiques.



P.72

NEUROSCIENCES

QUAND LES MACHINES DÉCODENT NOS INTENTIONS

Richard Andersen

Piloter une prothèse à la seule force de la pensée: c'est ce que permet un implant fiché dans la zone du cerveau qui crée nos intentions.

À LA UNE

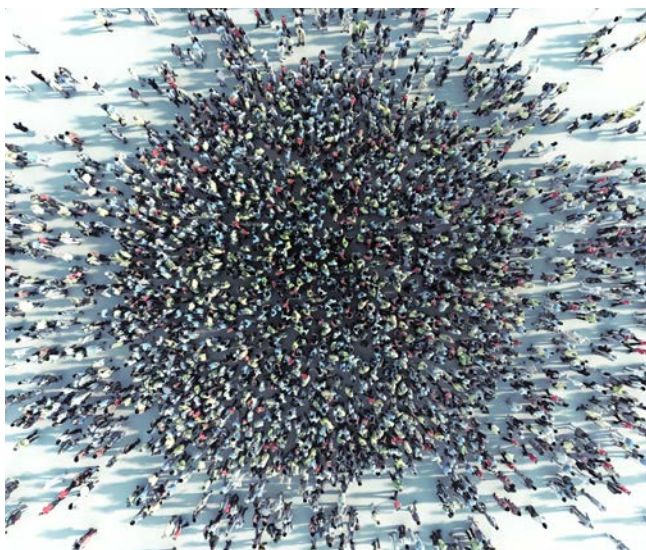
P.26

PSYCHOLOGIE

« MOINS LA FOULE EST DENSE, PLUS ELLE EST IMPRÉVISIBLE »

Entretien avec Mehdi Moussaïd

Comment organiser les zones urbaines pour que le trafic y soit fluide? Comment éviter les bousculades meurtrières lors de rassemblements? Comment lutter contre la propagation des fausses informations? Toutes ces questions sont au cœur d'une jeune discipline, l'étude des foules, qui commence déjà à fournir des réponses.



P.32

MATHÉMATIQUES

LA FOULE EN ÉQUATIONS

Bertrand Maury et Sylvain Faure

Imaginez que chaque individu d'une foule soit un pion sur un échiquier, ou encore que la foule soit une goutte qui dévale une montagne le plus vite possible. En s'appuyant sur de telles analogies, des physiciens et mathématiciens ont conçu des modèles de foules performants pour décrire l'évacuation d'un bâtiment ou le transit de passagers dans une gare.

RENDEZ-VOUS

P.80

LOGIQUE & CALCUL

DES TROUS À ENTOURER AVEC PARCIMONIE

Jean-Paul Delahaye

Laisser des trous dans un assemblage de carrés en minimisant le nombre de pièces utilisées: ce problème de géométrie n'est pas facile. Mais le cheminement vers sa solution illustre bien la démarche des mathématiciens.



P.86

ART & SCIENCE

Des bulles et des cellules

Loïc Mangin

P.88

IDÉES DE PHYSIQUE

Le mystère des pierres qui bougent

Jean-Michel Courty
et Édouard Kierlik

P.92

CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION

Les dytiques mâles ne manquent pas d'air

Hervé Le Guyader

P.96

SCIENCE & GASTRONOMIE

Les neuf goûts du canard laqué

Hervé This

P.98

A PICORER

A

CTUALITÉS

P. 6 Échos des labos

P. 18 Livres du mois

P. 20 Agenda

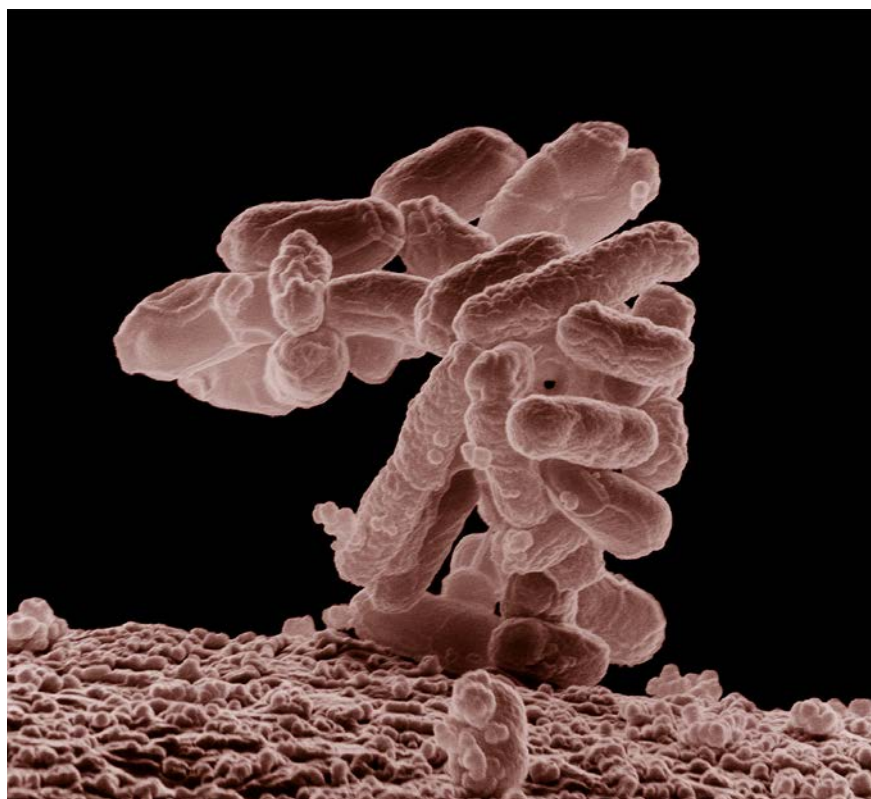
P. 22 *Homo sapiens informaticus*

P. 24 Questions de confiance

BIOLOGIE DE SYNTHÈSE

LE GÉNOME D'ESCHERICHIA COLI COMPLÈTEMENT RECODÉ

La bactérie *Escherichia coli* (ci-contre, un amas de ces microorganismes vu au microscope électronique) est très commune dans la flore intestinale de l'humain. L'étude de son ADN permet de mieux comprendre les mécanismes génétiques.



Pour supprimer des redondances dans le code génétique de la bactérie *Escherichia coli*, des chercheurs l'ont entièrement recodé. Et la souche produite est viable.

La biologie de synthèse est un domaine de recherche en plein essor. Afin de mieux comprendre les mécanismes génétiques et les lois du vivant, les scientifiques modifient de diverses façons l'ADN. En 2016, l'équipe de l'entrepreneur californien Craig Venter, spécialisé dans les biotechnologies, a synthétisé une cellule artificielle capable de se répliquer avec un nombre minimal de gènes: elle n'en comptait que 473, à comparer par exemple aux quelque 20 000 du génome humain. Par des approches similaires de suppression de gènes, d'autres

chercheurs ont réussi à réduire le génome de la bactérie *Escherichia coli* de près de 15%. Jason Chin, de l'université de Cambridge, et ses collègues ont adopté une autre approche. Ils ont cherché non pas à réduire la taille du génome d'*E. coli*, mais à remplacer certaines redondances du code génétique.

Cette tâche ambitieuse a été rendue possible grâce au développement récent de techniques de synthèse et d'assemblage de l'ADN. Cette molécule, avec sa structure en double hélice, est constituée d'une succession de bases azotées de quatre types: adénine (A), thymine (T), guanine (G) et

cytosine (C). Certaines de ces séquences, contenant parfois plusieurs milliers de bases, définissent des gènes dont la transcription permet la synthèse de protéines. Ces dernières sont composées d'une suite d'acides aminés, chacun étant codé par un triplet de bases dans l'ADN, un «codon». Par exemple, le triplet TCG code la sérine. Il existe des centaines d'acides aminés, mais les organismes vivants n'en utilisent que 20. Dès lors, 20 codons devraient suffire, mais le génome utilise tous les $4^3=64$ codons possibles: 61 d'entre eux codent des acides aminés et 3 servent de codons stop qui indiquent quand se termine un gène. Il y a donc redondance, plusieurs codons étant associés au même acide aminé (par exemple, la sérine est associée à 6 codons différents). On parle alors de «code dégénéré».

Un trésor bourguignon de la fin du xv^e siècle

Au sein du Dijon médiéval, la mise au jour d'un trésor monétaire témoigne des nombreux échanges de la puissante Bourgogne de la fin du xv^e siècle. L'archéologue Stéphane Alix, coauteur de la découverte, nous en dit plus.



Propos recueillis par FRANÇOIS SAVATIER

STÉPHANE ALIX,
archéologue
à l'Institut national de
recherche archéologique
préventive (Inrap)

Comment avez-vous découvert ce trésor monétaire ?

Nous étions en train d'effectuer le diagnostic archéologique préalable à des travaux, imposé par la loi, dans le secteur de Saint-Bégnigne au sein du Dijon médiéval. Dans les couches de la fin du Moyen Âge, nous avons trouvé les restes d'une petite boîte en bronze détériorée par les constructions modernes. Elle contenait des monnaies d'or et d'argent.

Combien exactement ?

Trente-quatre, mais la plupart de ces monnaies étaient collées les unes aux autres par la corrosion. Nous avons donc dû envoyer le tout au Centre de restauration et d'études archéologiques municipal de Vienne (dans le Rhône) pour que des restaurateurs les séparent et les nettoient afin de les rendre lisibles.

Et, dès lors, qu'a-t-on identifié ?

Le trésor contenait des monnaies des Sforza, la famille régnante de Milan, des monnaies de Ferrare, du Pape, des monnaies anglaises, de certaines

principautés du Saint-Empire germanique et d'autres, très rares, d'un évêché suisse... Ces pièces livrent un témoignage rare d'un point de vue numismatique sur la circulation des monnaies de valeur entre la Bourgogne de la fin du xv^e siècle et toute une série d'États européens. La remarquable qualité des pièces démontre la volonté de prestige des personnalités qui les dirigeaient, et leur diversité illustre les échanges internationaux entre les puissances de l'époque et l'influent duché de Bourgogne, qui, rappelons-le, s'étendait à l'époque de la région de Genève aux Pays-Bas.

Peut-on présumer que ces monnaies appartenaient à un marchand ?

Elles ont en tout cas été rassemblées par quelqu'un – petit aristocrate ou marchand – connecté à la sphère marchande « internationale ». Pour autant, il s'agit du pécule relativement modeste d'une personne privée, qui y a adjoint un bijou de famille – un médaillon de mariage constitué de deux lettres d'or émaillées verte et blanche (voir la photo ci-dessous) –, avant de le cacher dans le sol. Celui d'une maison probablement.

Ce trésor est-il d'une grande valeur ?

J'ignore tout de sa valeur pécunière, mais sa valeur numismatique est indéniablement très grande. Par ailleurs, si ma collègue Céline Capdeville et moi, qui sommes archéologues, avons apprécié de tomber sur des objets aussi beaux qu'intéressants, nous avons aussi été captivés par les niveaux inférieurs à celui qui contenait le trésor.

Pourquoi ?

Parce qu'on a mis au jour de très intéressants niveaux médiévaux plus anciens, dont l'étude sera utile pour reconstituer l'histoire de Dijon, et, au-dessous de ces couches, un cimetière gallo-romain de la fin de l'Antiquité que les historiens et archéologues soupçonnaient depuis longtemps, sans jamais avoir pu prouver son existence. C'est chose faite désormais. ■



En 2013, afin d'étudier ces redondances, une équipe a supprimé un codon stop du génome d'*E. coli* et l'a remplacé systématiquement par un codon équivalent. Mais cela n'avait un impact que sur un nombre limité (321) de codons dans l'ADN de la bactérie. Jason Chin et son équipe ont procédé à des modifications plus importantes. Ils ont remplacé deux codons de la sérine et un codon stop par des synonymes. Cela a impliqué de modifier pas moins de 18214 triplets de bases.

Le nouvel ADN a été conçu sur ordinateur et synthétisé par des processus chimiques bien maîtrisés. La difficulté rencontrée par les chercheurs venait de la taille du génome de la bactérie, qui comprend 4 millions de paires de bases. Comme il ne peut être synthétisé en une fois, les chercheurs ont dû produire des fragments de 100 000 bases, qui étaient injectés au fur et à mesure dans le génome d'*E. coli*. Ils ont finalement obtenu une lignée de bactéries au génome complètement recodé. Nommée *Syn61*, cette lignée est viable, mais ses membres se reproduisent plus lentement que leurs consœurs. En outre, les images au microscope indiquent que les bactéries *Syn61* sont légèrement plus longues.

La biologie de synthèse étant une discipline qui progresse vite, le record établi par l'équipe de Jason Chin ne tiendra pas très longtemps. Un consortium international achèvera bientôt la synthèse du génome complet de la levure *Saccharomyces cerevisiae*, soit 12 millions de paires de bases. Et la constitution d'un génome d'*E. coli* utilisant seulement 57 codons est aussi en cours.

Par ailleurs, le fait de réduire les redondances sur les codons présente un intérêt majeur. Il est alors possible de réaffecter un codon non utilisé et, par des opérations de génie génétique, lui faire correspondre un acide aminé que ne produisent pas les organismes vivants. Ce qui pourrait donner des protéines de synthèse aux fonctions nouvelles.

À terme, l'un des objectifs est de fabriquer des organismes spécialement conçus, par exemple, pour produire certains composés : des sortes de micro-usines sur mesure, à l'image des souches génétiquement modifiées d'*E. coli* qui produisent l'insuline humaine à destination des diabétiques. ■

SEAN BAILLY

J. Fredens et al., *Nature*, en ligne le 15 mai 2019

PLANÉTOLOGIE

COMMENT PLUTON PRÉSERVE UN OCÉAN LIQUIDE

Pluton présenterait un océan souterrain d'eau liquide. Mais pourquoi celui-ci n'a-t-il pas gelé ? Une couche isolante formée d'hydrates de méthane expliquerait sa persistance.

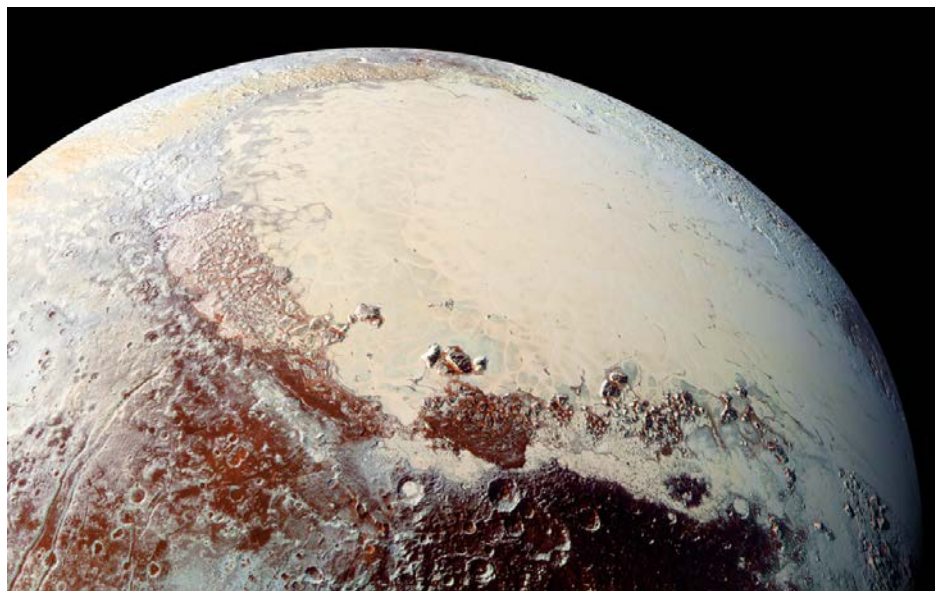
Sur Pluton, lointaine planète naine située aux confins du Système solaire, la température moyenne de surface est de -229°C . L'eau y est donc présente surtout sous forme de glace. Et pourtant, elle abriterait un océan liquide sous sa surface!

Cette hypothèse découle de l'observation d'un excès local de masse identifié grâce à des anomalies gravitationnelles mesurées par la sonde *New Horizons* lors de son passage près de la planète naine en 2015. La même méthode suggère aussi que des océans souterrains existent sur certains satellites glacés de Jupiter et Saturne, comme Europe ou Encelade. Pour ces derniers, les planétologues ont proposé des mécanismes qui expliquent comment ces océans n'ont pas gelé, mais ils ne s'appliquent pas au cas de Pluton. Pour cette planète naine, Shunichi Kamata, de l'université de Hokkaido, au Japon, et Francis Nimmo, de l'université de Californie à Santa Cruz, ont proposé un autre scénario.

Dans le cas d'Europe ou Encelade, ces lunes englacées sont soumises à d'intenses forces de marée exercées par la planète géante proche, respectivement Jupiter et Saturne. Ces forces provoquent des frictions au sein des lunes gelées, d'où un dégagement de chaleur. Cette dernière, avec la chaleur émise par la radioactivité, reste ensuite piégée sous la croûte de glace et maintient liquide l'eau des océans souterrains.

Pluton n'est pas le satellite d'une planète géante. Par conséquent, elle n'est pas soumise à des forces de marée aussi intenses. Elle a de plus une couche de glace trop mince pour retenir suffisamment la chaleur. Un scénario possible suppose une forte concentration d'ammoniac dans l'océan, qui abaisse alors la température de solidification de l'eau. Cependant, cette théorie est difficile à défendre en l'absence d'indices de la présence d'ammoniac sur Pluton.

Shunichi Kamata et ses collègues proposent un autre scénario. Ils ont supposé qu'il existe entre l'océan et la croûte de glace une couche solide, formée de clathrates de méthane. Les clathrates de méthane (ou hydrates de méthane) sont composés de glace d'eau dans laquelle est piégé du méthane gazeux: les molécules d'eau forment des nanocages où se niche le méthane. Or ces hydrates conduisent 5 à 10 fois moins



Sur Pluton, l'anomalie gravitationnelle associée à la région de Sputnik Planitia suggère que la croûte de surface cache un océan d'eau liquide.

bien la chaleur que la glace d'eau et sont 10 fois plus visqueux. Cette couche isolante limiterait les pertes de chaleur de l'intérieur de la planète naine, qui pourrait ainsi rester bien plus chaud que la croûte de glace en surface.

Mais d'où viendrait cette couche d'hydrates de méthane? Elle se serait formée à partir de gaz, capturé en profondeur lors de la naissance de Pluton, ou produite à partir de la fragmentation de matière organique à plus de 150°C , température atteinte dans le cœur de la planète naine pendant une partie de son histoire. Le piégeage du méthane dans les hydrates explique aussi la faible proportion de ce gaz à la surface de Pluton, par comparaison à ce qu'on observe sur d'autres planètes.

Les simulations effectuées par Shunichi Kamata et son équipe ont montré qu'en l'absence d'une couche d'hydrates l'océan aurait gelé en 3,8 milliards d'années, alors qu'avec une telle couche, il resterait liquide après 4,5 milliards d'années (l'âge du Système solaire). Si ce scénario est le bon, et au vu de l'abondance du méthane dans l'Univers, on peut penser qu'il existe un grand nombre d'océans cachés partout dans le cosmos! ■

IZIA PÉTILLON

S. Kamata et al., *Nature Geoscience*, vol. 12, pp. 407-410, 2019

POUR LES SINGES, UN DRONE EST UN AIGLE

Les vervets, des singes africains de la famille des cercopithécidés, émettent des cris d'alarme afin d'avertir leurs congénères de la présence de leurs trois prédateurs. Ils disposent de cris distincts pour signaler « guépard », « serpent » ou « aigle ». Pour tester si les vervets confrontés à une menace inconnue créeraient un cri, l'équipe de Julia Fischer, du Centre allemand de primatologie, à Göttingen, a fait survoler un groupe par un drone. Les singes n'ont pas créé de nouveau « mot », mais ont crié : « Aigle ! ».

PRÉDÉCESSEUR THAI DU T-REX

Adun Samathi, jeune paléontologue thaï et doctorant à l'université de Bonn, a découvert un prédecesseur du *Tyrannosaurus rex* en étudiant des os conservés au musée Sirindhorn, en Thaïlande. Nommé *Phuwiangvenator yaemniyommi*, ce mégaraptor de 6 mètres de long avait de grands bras et un long bec denté pour museau. Désormais attentif aux thérapodes thaïlandais, l'étudiant est ensuite tombé sur un autre mégaraptor, comparable, mais plus petit (4,5 mètres). Sauf par son nom : *Vayuraptor nongbualamphuensis* !

RÉSEAUX NEURONAUX POUR LA SISMOLOGIE

La multiplication rapide des données sismiques oblige à en accroître les capacités de traitement. Des chercheurs de l'Institut géophysique de Karlsruhe ont entraîné un réseau de neurones artificiels en se servant de 411 séismes enregistrés par un réseau sismique du nord du Chili. Cela a suffi pour que le réseau neuronal devienne aussi performant que les sismologues pour déterminer les temps d'arrivée des ondes sismiques, dont on déduit par triangulation les hypocentres et épicentres des séismes.

POLLUTION ROMAINE

L'homme n'a pas attendu la révolution industrielle et la démocratisation de l'automobile pour polluer l'atmosphère avec du plomb. L'équipe de Susanne Preunkert, du CNRS et de l'Institut des géosciences de l'environnement, à Grenoble, a montré qu'au cours de l'Antiquité, les Romains ont relâché dans l'air des quantités notables de métaux lourds.

Pour parvenir à ce constat, les chercheurs se sont rendus dans le massif du Mont-Blanc, où ils ont étudié les couches les plus profondes du glacier du col du Dôme. L'analyse des couches de glace a révélé la présence de plomb et d'antimoine, deux métaux lourds très toxiques. Associée à une datation au carbone 14 de résidus organiques, l'étude des métaux dans cette glace a permis de repérer deux pics distincts d'émission de plomb. Le premier a eu lieu à l'époque de la République, soit entre 350 et 100 avant notre ère, tandis que le second s'est produit durant la période de l'Empire, soit les deux premiers siècles de notre ère.

Selon Susanne Preunkert et ses collègues, ces émissions étaient dues aux activités minières et à l'extraction de plomb et d'argent par les Romains. En effet, ils extrayaient du minerai de plomb argentifère puis le chauffaient à 1200 °C



Les glaciers du massif du Mont-Blanc présentent des traces de pollution atmosphérique au plomb qui datent de l'époque romaine.

pour séparer l'argent du plomb. Au cours du processus, une partie du plomb, très volatil, s'échappait dans l'atmosphère. Grâce aux données qu'ils ont récoltées, les chercheurs ont montré que les Romains ont multiplié la teneur atmosphérique naturelle en plomb par un facteur 10, ce qui demeure tout de même inférieur à la pollution engendrée par les rejets des automobiles entre les années 1950 et 1990 (50 à 100 fois la teneur naturelle). Pour autant, les émissions toxiques découlant des activités romaines se sont étalées sur une période bien plus longue que celle durant laquelle les voitures utilisaient de l'essence contenant du plomb. ■

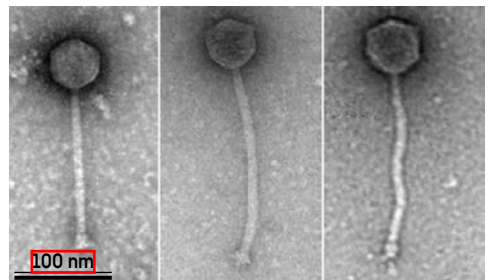
WILLIAM ROWE-PIRRA

S. Preunkert et al., *Geophysical Research Letters*, en ligne le 7 mai 2019

UN COCKTAIL DE PHAGES

Alors que le problème des bactéries résistantes aux antibiotiques s'aggrave, le salut viendra peut-être des virus. Pour la première fois, un cocktail de bactériophages (ou phages) génétiquement modifiés, des virus capables d'infecter et de détruire des bactéries, a été utilisé pour venir à bout d'une infection résistante de *Mycobacterium abscessus* chez une jeune fille de 15 ans.

Graham Hatfull, de l'université de Pittsburg, aux États-Unis, et ses collègues ont voulu personnaliser le traitement pour le rendre le plus efficace possible. Ils ont utilisé des bactéries isolées de la patiente afin d'identifier des phages capables de lutter contre l'infection. Dans leur collection de plus de 10 000 phages spécifiques des mycobactéries, ils n'en ont trouvé qu'un seul capable de tuer la souche bactérienne. Afin



Un mélange de ces trois phages a été utilisé pour traiter une patiente infectée par une bactérie antibiorésistante.

de limiter les risques d'échecs, ils ont opté pour traiter la patiente avec un cocktail de plusieurs phages. L'équipe a donc manipulé le génome de deux autres phages afin de les rendre plus agressifs. Même si le traitement a été contraignant (des injections intraveineuses toutes les 12 heures pendant 32 semaines), la stratégie a été payante. ■

NOËLLE GUILLON

R. M. Dedrick et al., *Nature Medicine*, vol. 25, pp. 730-733, 2019

EN IMAGE

L'ORIGINE DES STRUCTURES RAYONNÉES D'IMPACT

Sur la Lune, le cratère Copernic présente des traînées radiales d'éjectas s'étirant jusqu'à 800 kilomètres au-delà du point d'impact. On retrouve de tels motifs autour de nombreux cratères lunaires, mais aussi sur Mars. Ces structures se forment au moment de la collision... Pourtant, en laboratoire, les expériences qui simulent de tels impacts ne créent pas de structures rayonnées. Felipe Pacheco-Vázquez, de l'université autonome de Puebla, au Mexique, a montré qu'il faut considérer des projectiles non sphériques pour reproduire de tels motifs.

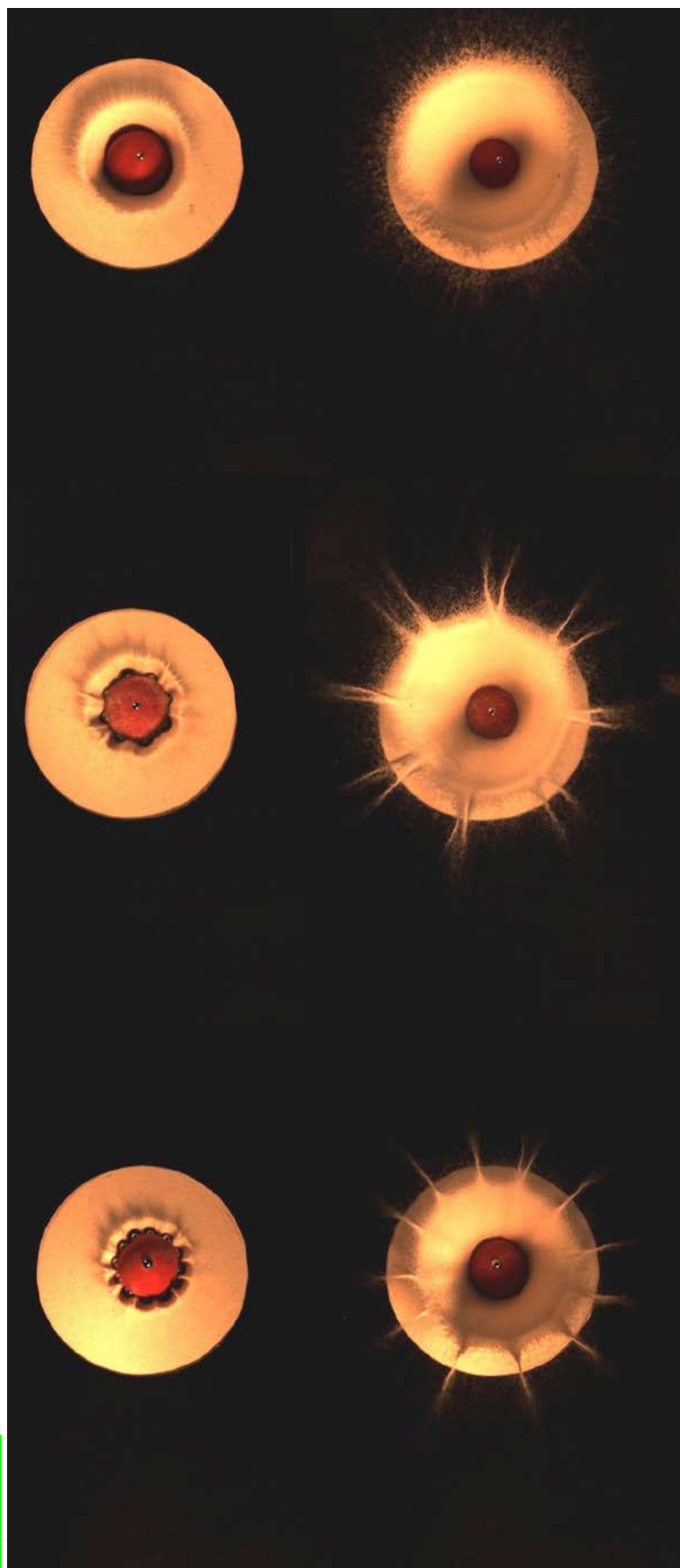
Quand un projectile sphérique frappe de front une surface plane, il soulève une nappe d'éjectas parfaitement symétrique qui se dépose autour du cratère sans former de rayons. Dans le cas où l'objet n'est pas sphérique, Felipe Pacheco-Vázquez a montré que si la surface du projectile présente des courbures concaves à son interface avec le sol, elle focalise le matériau projeté et le redirige dans une direction particulière, ce qui produit une structure rayonnée. Ainsi, en fixant par exemple 4 protubérances sur une bille de métal recouverte de pâte à modeler, le chercheur a obtenu 8 raies d'éjectas lors d'un impact sur une surface plane de sable (*ci-contre, de haut en bas, les images successives, sur environ 0,4 seconde, de trois impacts d'une bille munie respectivement de 0, 8 et 12 protubérances*). Il a créé le même genre de structures avec des projectiles irréguliers, plus représentatifs de la forme d'une météorite.

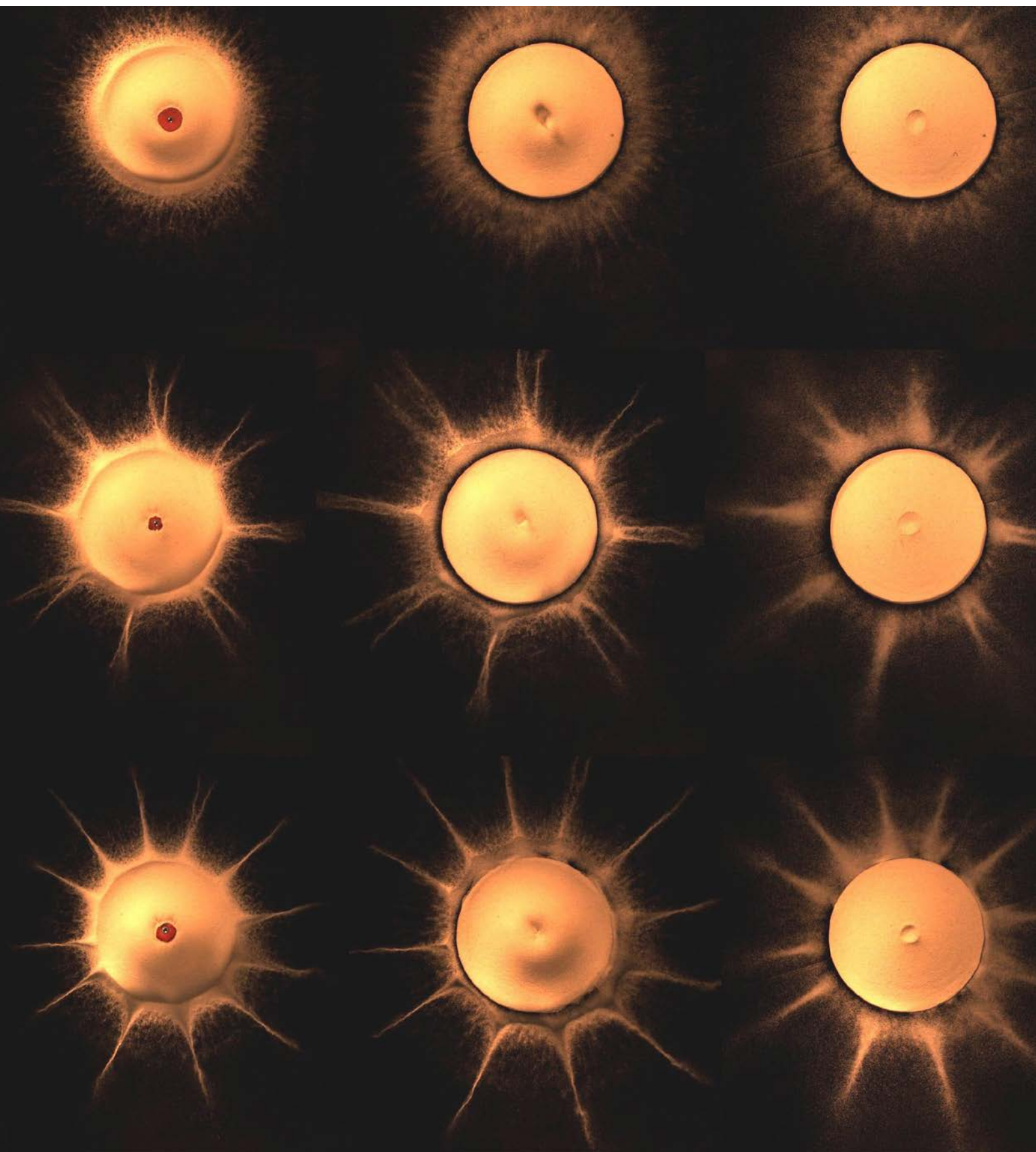
Le physicien a aussi étudié la forme du cratère. Il a constaté que lors d'une collision de faible énergie, le cratère préserve une certaine trace de la forme du projectile (un impacteur triangulaire laisse un cratère quasi triangulaire). Mais plus l'énergie de l'impact est élevée et plus la forme du cratère devient circulaire. Cela s'expliquerait par le fait qu'un impact de grande énergie pénètre plus profondément dans le sol et facilite le réarrangement du matériau qui compose le sol. Il tend alors vers la forme optimale, qui est un cratère circulaire. Ce résultat permet de comprendre pourquoi la plupart des cratères d'impact sur la Lune sont de forme circulaire alors que les météorites ne sont pas particulièrement sphériques. ■

S. B.

F. Pacheco-Vázquez, *Physical Review Letters*, vol. 122, article 164501, 2019

© F. Pacheco-Vázquez





GÉNÉTIQUE

DES ÉLÉMENTS MOBILES DE NOTRE GÉNOME PRIS SUR LE VIF

Un fragment du génome humain, le rétrotransposon L1, a acquis la capacité de se dupliquer tout le long de l'ADN, même s'il ne persiste que dans certaines régions.

Dans le génome humain, comme chez tous les organismes vivants, des mutations surviennent d'une génération à l'autre et contribuent à la diversité génétique de la population. Un mécanisme clé de mutation est le déplacement ou la duplication de fragments entiers du génome à d'autres endroits de sa séquence d'ADN. Au fil de l'évolution, de tels éléments mobiles, dits transposables, ont ainsi colonisé jusqu'à environ 50 % du génome humain, voire plus. Or on sait peu de choses sur les lois qui régissent l'insertion de ces éléments dans le génome. Ont-ils des régions de prédilection ?

En fait, oui et non... C'est ce que vient de montrer l'équipe de Gaël Cristofari, à l'institut de recherche sur le cancer et le vieillissement de Nice, en «photographiant» l'un d'eux, le rétrotransposon L1, juste après sa duplication dans des cellules humaines.

L'équipe n'a pas choisi le rétrotransposon L1 au hasard. C'est le seul élément transposable autonome encore actif dans le génome humain. Avec ses quelque 500 000 copies, il occupe à lui seul 17 % de notre patrimoine génétique. Les autres éléments transposables autonomes, c'est-à-dire portant les gènes nécessaires à leur dissémination, sont devenus inopérants et se sont fixés dans le génome. Quant à ceux non autonomes, soit ils se sont eux aussi fixés, soit ils ont besoin de gènes du rétrotransposon L1 pour se répandre.

En d'autres termes, le rétrotransposon L1 est non seulement l'unique élément encore capable de se dupliquer tout seul, mais un ingrédient clé de la mobilité des autres éléments transposables encore actifs du génome humain. Or, selon les endroits où ses copies s'insèrent, elles entraînent parfois des maladies génétiques comme des hémophilies, des myopathies ou des cancers. Aussi serait-il particulièrement utile de comprendre les lois qui sous-tendent ces insertions.

Durant la vie d'un individu, il est rare que ses rétrotransposons L1 s'activent. Cela se produit parfois durant l'embryogenèse ou dans des cellules cancéreuses. En temps normal, des marques chimiques, dites épigénétiques,



Les «éléments transposables» sont des fragments du génome capables de se déplacer ou de se dupliquer le long de celui-ci. Le rétrotransposon L1 est l'un des rares encore mobiles chez les humains.

50 %

ENVIRON DU GÉNOME HUMAIN SONT CONSTITUÉS D'ÉLÉMENTS MOBILES CONNUS OU DE LEURS VESTIGES. CHEZ LE MAÏS, ILS OCCUPENT JUSQU'À 85 % DU GÉNOME.

l'empêchent de se dupliquer. Pour observer de toutes nouvelles insertions du rétrotransposon, Gaël Cristofari et ses collègues ont donc directement introduit, dans une lignée cellulaire humaine en culture, le fragment d'ADN actif, sans ces marques épigénétiques. Ils ont alors comparé la cartographie des quelque 1500 nouvelles insertions obtenues à celles disponibles pour diverses lignées cellulaires humaines dans des bases de données génomiques.

Résultat : malgré quelques biais observés (une préférence, notamment, pour les régions qui se répliquent tôt), le rétrotransposon L1 s'est inséré tout le long du génome. Or, dans les bases de données, au contraire, certaines régions sont clairement privilégiées. Cela suggère que les nouvelles copies du rétrotransposon ne sont tolérées qu'à certains endroits du génome et que celles qui se sont insérées ailleurs sont éliminées *a posteriori*, par sélection naturelle. Une information qui pourrait aider, notamment, à découvrir les régions où elles sont susceptibles de causer des dommages, par exemple lors de cancers. ■

MARIE-NEIGE CORDONNIER

I. Sultana, D. van Essen *et al.*, *Molecular Cell*, vol. 74, en ligne le 2 mai 2019

PHYSIOLOGIE

LE CERVEAU GÈRE LE FLUX SANGUIN

Un contrôle précis du flux sanguin dans chaque partie du corps est essentiel à la survie. Certains neurones situés dans le bulbe rachidien pourraient constituer le centre de contrôle cérébral du système cardiovasculaire, en régulant le flux sanguin dans différentes parties de l'organisme. David Farmer, de l'université de Melbourne, et ses collègues ont utilisé, chez le rat, des virus génétiquement modifiés pour rendre ces cellules lumineuses. Ils ont ainsi montré qu'elles établissent des connexions avec différentes zones du système cardiovasculaire. Les chercheurs ont ensuite rendu ces neurones sensibles à la lumière, afin d'étudier leur activité quand on les stimule par un flash lumineux. Ils ont découvert que ces cellules avaient un effet excitateur sur différentes parties du corps, notamment le cœur et les vaisseaux sanguins des pattes antérieures et postérieures de l'animal. ■

ALINE GERSTNER

D. G. S. Farmer et al., *The Journal of Physiology*, en ligne le 11 mai 2019

BIOPHYSIQUE

SUPERNOIR : L'ATOUT SÉDUCTION DES ARAIGNÉES-PAONS



Les araignées-paons *Maratus speciosus* sont connues pour les spectaculaires parades nuptiales des mâles. Ces derniers dressent et agitent leur abdomen coloré pour séduire les femelles.

ETHOLOGIE

BONOBO ENTREMETTEUSE

Martin Surbeck, de l'institut Max-Planck d'anthropologie évolutionnaire, à Leipzig, et des collègues ont observé des populations sauvages de bonobos en République démocratique du Congo et des populations sauvages de chimpanzés en Côte-d'Ivoire, en Tanzanie et en Ouganda. Ces chercheurs ont découvert que si chez les deux espèces les mères défendent leurs rejetons dans les conflits entre mâles, les mères bonobos (et, rarement, des mères chimpanzés) les aident en plus à s'accoupler ! En effet, elles usent de leur rang dans le groupe pour favoriser l'accès de leur fils à des femelles de meilleur statut ; elles interviennent aussi dans les tentatives d'accouplement d'autres mâles pour les en empêcher ; et elles amènent volontairement leurs fils aux femelles en ovulation. Martin Surbeck et ses collègues soulignent que ce comportement de la mère bonobo augmente nettement le succès reproductif de ses fils. ■

F. S.

M. Surbeck et al., *Current Biology*, vol. 29 (10), pp. R354-R355, 2019

Chez les araignées-paons *Maratus speciosus* et *Maratus karrie*, des espèces endémiques d'Australie, les femelles sont très exigeantes dans le choix de leur partenaire. Elles sont très sensibles aux motifs et surtout aux couleurs qu'il arbore sur son abdomen. Pourtant, le mâle présente aussi des taches d'un noir très profond sur cette partie du corps. Quel rôle jouent-elles ? Dakota McCoy, de l'université Harvard, et ses collègues ont montré que ces zones de l'abdomen absorbent jusqu'à plus de 99,5% de la lumière visible, de quoi concurrencer certains des matériaux artificiels les plus performants. On parle alors de supernoir.

Cet effet spectaculaire est obtenu grâce à une structure microscopique organisée. Les chercheurs ont distingué deux types d'agencements. Le premier est constitué d'excroissances, déjà étudié chez les oiseaux de paradis ou certains papillons ; le second, moins connu, est un réseau de bosses microscopiques en forme de lentilles. La lumière qui pénètre dans une bosse est absorbée dans la couche sous-jacente contenant des pigments. Grâce à l'organisation en réseau, la lumière qui se réfléchit sur une microlentille est dirigée vers une autre où une fraction de la lumière sera encore absorbée.

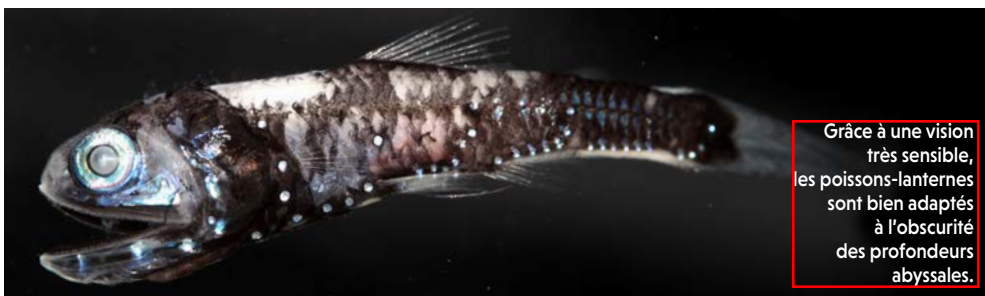
D'après Dakota McCoy et ses collègues, l'absence de réflexion lumineuse est à l'origine d'un biais sensoriel qui altère l'adaptation chromatique : les taches colorées entourant le supernoir apparaissent alors très vives, voire brillantes, critère déterminant pour les femelles qui cherchent un partenaire. Comme chez les oiseaux de paradis, le noir dû à une organisation structurale sert ainsi à séduire chez les araignées-paons : on a là un exemple de convergence évolutive dans la sélection sexuelle. Mais la structure en microlentilles trouvera peut-être une autre utilisation très différente : améliorer l'efficacité des panneaux solaires ! ■

J. P.

D. E. McCoy et al., *Proceedings of the Royal Society B*, vol. 286, article 20190589, 2019

BIOLOGIE ANIMALE

L'HYPERVERSION DES ABYSSES



Grâce à une vision très sensible, les poissons-lanternes sont bien adaptés à l'obscurité des profondeurs abyssales.

A plus de 200 mètres sous la surface de la mer, hormis la bioluminescence des poissons et les quelques photons qui arrivent de la surface, l'obscurité règne. Pourtant, les poissons des grands fonds sont capables de détecter d'infimes émissions de lumière. Ils pourraient même percevoir le monde abyssal en couleurs, comme l'indiquent Zuzana Musilova, de l'université Charles, à Prague, et ses collègues, qui se sont intéressés à la rétine très sensible de ces vertébrés.

De façon générale, chez les vertébrés, la capacité de voir dans l'obscurité et de voir en couleurs repose sur un compromis qui fait appel à deux sortes de cellules photosensibles de la rétine: les cônes et les bâtonnets. Si les bâtonnets nécessitent peu de lumière pour fonctionner, ils ne produisent qu'une image en noir et blanc, car ils n'ont qu'un seul type de pigment photosensible: la rhodopsine. Les

cônes, en revanche, actifs seulement sous forte luminosité, sont capables de discerner des couleurs. En effet, il existe deux à quatre types de cônes (selon les espèces) dotés de pigments, des opsines, sensibles à différentes longueurs d'onde du spectre lumineux.

Zuzana Musilova et ses collègues ont étudié les différentes opsines et rhodopsines produites chez plus de 101 espèces de poissons. Les biologistes ont montré que les animaux des abysses ont acquis de façon indépendante de nouveaux gènes permettant de produire entre 3 et 14 rhodopsines différentes. Avoir plusieurs types de bâtonnets permet peut-être une perception nuancée de la faible bioluminescence, analogue à la perception des couleurs par les cônes. ■

CORALINE MADEC

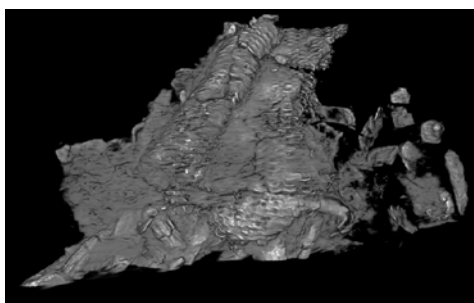
Z. Musilova et al., *Science*, vol. 364, pp. 588-592, 2019

ARCHÉOLOGIE

UNE COTTE DE MAILLES SOUS X

Les Gaulois ont inventé la cotte de mailles. Toutefois, hors des représentations (sur le célèbre chaudron de Gundestrup par exemple) ou des mentions d'auteurs anciens (Diodore de Sicile), on n'a, à l'échelle de l'Europe, que quelques témoignages archéologiques de cottes de mailles gauloises.

À considérer l'amas informe mis au jour par des archéologues sur le mont Mormont, près d'Éclépens, dans le canton de Vaud, en Suisse, on comprend pourquoi. «Après avoir vu de petits anneaux, nous avons su qu'il s'agissait d'une cotte de mailles», témoigne Claudia Nitu, membre de l'équipe. Étant donné la masse de rouille en présence, les archéologues ont supputé que la cotte de mailles enveloppe une série d'objets offerts aux dieux dans l'une des 250 fosses sacrificielles découvertes sur le



L'une des images de la cotte de mailles obtenues grâce à la plateforme de microtomographie X de l'EPFL.

site. Pour en avoir le cœur net, ils ont fait microtomographier l'amas aux rayons X à l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL). Les images 3D ont révélé 160 objets, dont plusieurs agrafes pour meuble, quatre fibules (broches à vêtements), un tranchant, une attache de poignée de chaudron, etc. ■

F. S.

Communication de l'EPFL, <https://bit.ly/2We78d4>

EN BREF

CANNEBERGES : UN EFFET ANTIBACTÉRIEN

Petite baie très prisée en Amérique pour son goût acidulé et ses antioxydants, la canneberge aide aussi à combattre les bactéries. Autour de Nathalie Tufenkji, des chercheurs de l'université McGill ont montré qu'en présence de certaines molécules extraites de canneberges, des bactéries responsables d'affections, telles les infections urinaires, les pneumonies et les gastroentérites, deviennent sensibles à des doses nettement moins élevées d'antibiotiques.

TRÈS « FAMILLE », LES ORQUES

Christophe Guinet, du Centre d'études biologiques de Chizé, et des collègues ont suivi pendant plusieurs années les orques de l'archipel Crozet par photo-identification, et constaté que l'arrivée d'une pêcherie illégale a conduit à la décimation de nombreux clans. En observant la façon dont les orques orphelines errent de clan en clan, ils ont établi que plus leurs séjours dans d'autres groupes sont courts, plus les orques isolées meurent. Chez les orques, la vraie sécurité sociale, c'est la famille.

LA POTERIE PUEBLO N'AVAIT PAS DE SEXE

Afin d'étudier la répartition des tâches au sein de la culture Pueblo (Arizona), John Kantner, de l'université de Floride du Nord, et ses collègues ont étudié les empreintes digitales conservées sur des poteries datant d'il y a 1 000 ans. À partir de la mesure de la largeur des crêtes d'empreintes digitales, les chercheurs ont déterminé si les potiers étaient des hommes ou des femmes. Il semble que, au sein de la culture Pueblo, la production de poteries domestiques n'était pas réservée à l'un ou l'autre sexe.

LES PEINTURES DE HIMA DATÉES

Les proportions de manganèse et de fer dans le vernis naturel qui se dépose sur les rochers indiquent l'âge des surfaces. C'est ce qu'a montré l'équipe de Meinrat Andreae, de l'institut Max-Planck de chimie de Mayence, en Allemagne, en analysant la composition de cette microcouche. Les chercheurs ont mis au point cette nouvelle technique de datation afin d'estimer l'âge des pétroglyphes de Bir Hima, dans la province de Najran, en Arabie saoudite. Depuis longtemps, les âges de ces peintures sur roches montrant des scènes de chasse, des danses rituelles et de curieuses formes anthropomorphes font l'objet d'une controverse entre spécialistes. La méthode des chercheurs allemands a conduit à placer ces œuvres « tout au long de l'Holocène, la plus ancienne datant de 7000 ans et la plus récente de quelques siècles seulement », explique Meinrat Andreae. ■

F. S.

D. Macholdt et al., *The Holocene*, en ligne le 19 mai 2019

DES GOUTTES DE SABLE

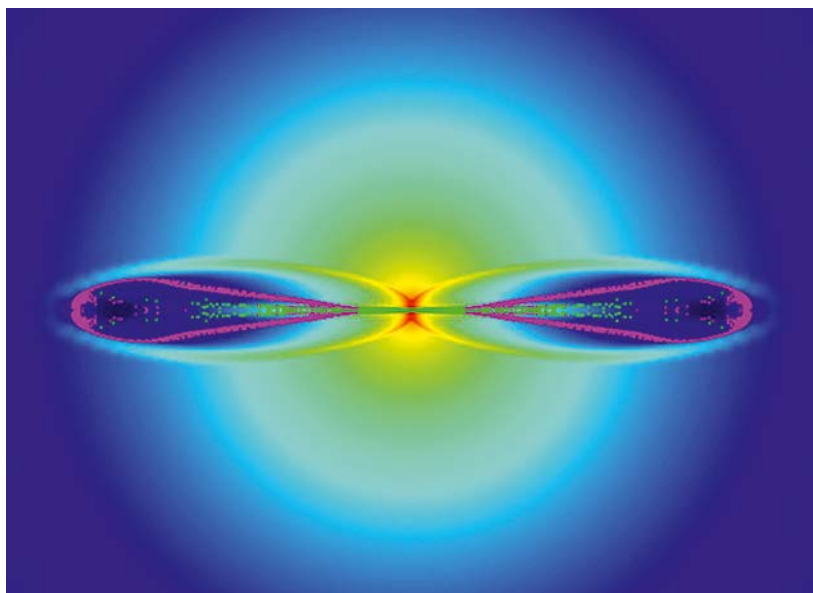
L'instabilité dite de Rayleigh-Taylor survient quand un fluide peu dense se trouve sous un fluide plus dense. Le premier tend à former des filaments et des gouttes qui s'élèvent dans le second. Comme les forces en jeu sont la poussée d'Archimède et la tension de surface, il est surprenant d'observer un phénomène similaire dans un milieu granulaire. C'est pourtant ce qu'ont mis en évidence Christopher Boyce, de l'université Columbia, et son équipe.

Les chercheurs ont placé une couche de grains de sable au-dessus d'une autre moins dense. En agitant verticalement le système et en soufflant de l'air dans le milieu de bas en haut, ils ont reproduit le comportement d'instabilité des fluides. Des « gouttes » granulaires se formaient au bout de longs filaments. Explication : l'air ne circulant pas de la même façon entre grains de tailles différentes, il en résulte une force d'entraînement vers le haut, qui maintient les grains légers ensemble et conduit à la formation des gouttes. ■

S. B.

C. P. McLaren et al., *PNAS*, vol. 116 (19), pp. 9263-9268, 2019

EXPLOSION EN JETS DES PREMIÈRES ÉTOILES?



Dans cette simulation de l'explosion d'une étoile de première génération, deux jets expulsent de grandes quantités de zinc (points verts).

Plusieurs centaines de millions d'années après le Big Bang, les premières étoiles de l'Univers se sont allumées. Gigantesques, elles ont eu une brève durée de vie et ont fini dans de spectaculaires explosions, des supernovæ. Si ces étoiles ont produit beaucoup d'éléments plus lourds que l'hydrogène et l'hélium dans leur cœur, on pensait que, lors de la supernova, une grande part de ces éléments était restée piégée dans le cœur qui s'était effondré sur lui-même et qui était devenu une étoile à neutrons ou un trou noir. Mais comme ces étoiles ont toutes disparu, les conditions précises de leur fin restent mal connues. Rana Ezzeddine, du MIT (institut de technologie du Massachusetts), aux États-Unis, et ses collègues viennent de bouleverser ce qu'on croyait savoir de ces premières supernovæ. Elles n'auraient pas pris la forme d'explosions symétriques et sphériques, mais auraient propulsé d'immenses jets de matière dans l'espace interstellaire, qui auraient enrichi très tôt celui-ci en éléments lourds.

Pour arriver à cette conclusion, les chercheurs se sont d'abord intéressés à HE 1327-2326, une étoile de deuxième génération, très ancienne et pauvre en éléments lourds, ce qu'on attend d'un astre né des restes des étoiles de la première génération selon le scénario classique. En analysant plus précisément sa composition, les chercheurs ont montré que cette étoile présente une abondance en zinc anormalement importante. Ils ont suggéré que l'explosion en fin de vie de certaines étoiles de la première génération aurait produit des jets de matière dix fois plus puissants que les supernovæ classiques. Ce phénomène aurait alors disséminé les éléments produits au cœur de l'astre, tels que le zinc. Les chercheurs ont confirmé cette hypothèse grâce à des simulations numériques. Reste à savoir comment de tels jets peuvent apparaître lors d'une explosion de supernova. ■

LUCAS GIERCZAK

R. Ezzeddine et al., *The Astrophysical Journal*, vol. 876(2), 2019

MATHÉMATIQUES

L'HYPOTHÈSE DE RIEMANN VACILLE MAIS NE TOMBE PAS

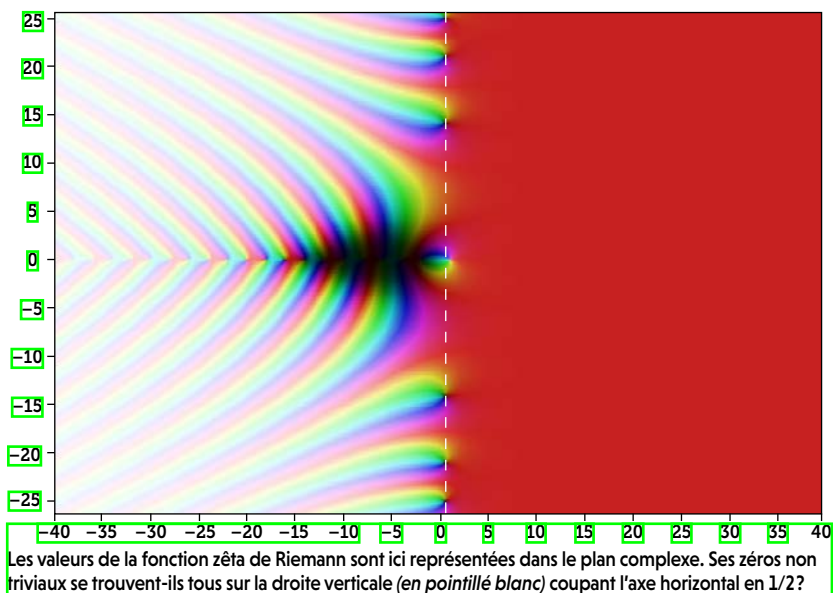
Pour tenter de démontrer cette célèbre conjecture, des mathématiciens ont réexploré une piste délaissée, car jugée trop difficile, et ont obtenu un résultat important.

L'hypothèse de Riemann est l'un des problèmes ouverts les plus importants en mathématiques. Si de nombreux indices suggèrent que cette conjecture, formulée en 1859 par l'Allemand Bernhard Riemann, est vraie, cela n'a toujours pas été démontré. De nombreuses pistes ont été explorées, sans aboutir. Mais en retravaillant sur une approche abandonnée, Ken Ono, de l'université Emory, à Atlanta, aux États-Unis, Don Zagier, de l'institut Max-Planck de mathématiques, à Bonn, en Allemagne, et deux collègues ont réalisé une avancée intéressante.

Le point de départ de l'hypothèse de Riemann est une fonction d'une variable s définie comme la somme infinie des inverses des entiers positifs où chaque terme est élevé à la puissance s . Cette fonction se prolonge aux valeurs complexes de s , c'est-à-dire aux nombres de la forme $s=a+ib$, a et b étant des nombres réels et i le symbole vérifiant $i^2=-1$ (a est la partie «réelle» de s et b sa partie «imaginaire»). La fonction obtenue, notée $\zeta(s)$, est la «fonction zêta de Riemann».

Cette fonction a un intérêt majeur en théorie des nombres. Elle est reliée à la façon dont sont répartis les nombres premiers, ces entiers positifs n'ayant pas d'autres diviseurs que 1 et eux-mêmes, comme 2, 3, 5, 7, 11, 13... La fonction zêta de Riemann, et notamment la répartition de ses zéros, c'est-à-dire les valeurs de s pour lesquelles $\zeta(s)=0$, offrirait une bonne estimation de cette distribution si l'hypothèse de Riemann est vraie. Celle-ci affirme qu'à l'exception des zéros dits triviaux (les nombres pairs négatifs: -2, -4, -6, etc.), les zéros de la fonction zêta ont tous pour partie réelle $a=1/2$.

Parmi les pistes explorées pour vérifier cette conjecture, le mathématicien hongrois George Pólya a montré en 1927 que l'hypothèse de Riemann est équivalente à un autre problème, celui de prouver l'hyperbolicité de certains polynômes, dits de Jensen (du nom du mathématicien danois Johan Jensen). Un polynôme à coefficients réels est dit hyperbolique si ses zéros sont tous réels. Il faut donc prouver cette propriété pour les polynômes de Jensen. Ceux-ci sont définis notamment par deux paramètres: d , leur degré, et n , leur



10¹³

ZÉROS NON TRIVIAUX DE LA FONCTION ZÊTA DE RIEMANN ONT ÉTÉ CALCULÉS EN 2004, ET LEUR PARTIE RÉELLE EST BIEN ÉGALE À 1/2. MAIS IL SUFFIRAIT QUE L'ON TROUVE UN SEUL ZÉRO NON TRIVIAL DE PARTIE RÉELLE DIFFÉRENTE POUR QUE L'HYPOTHÈSE DE RIEMANN SOIT INFIRMÉE.

«décalage». Le problème est qu'il existe une infinité de ces polynômes. Des mathématiciens ont démontré des cas particuliers de l'hyperbolicité des polynômes de Jensen, mais cette approche était considérée comme trop difficile pour être généralisée afin de prouver l'hypothèse de Riemann.

S'ils n'ont pas démontré cette propriété pour tous les polynômes de Jensen, Ken Ono et ses collègues l'ont confirmée pour une vaste classe de ces objets. Pour y parvenir, ils ont considéré d'autres polynômes, dits d'Hermite (qui permettent notamment d'exprimer les fonctions d'onde de l'oscillateur harmonique, en physique quantique). Les chercheurs ont montré que les polynômes d'Hermite donnent une bonne approximation des polynômes de Jensen quand le décalage n est assez grand et pour toute valeur de d . Or les polynômes d'Hermite étant hyperboliques, les mathématiciens ont montré ainsi l'hyperbolicité d'une large classe de polynômes de Jensen. C'est un progrès notable, mais il reste à voir comment passer de l'étape «pour tout n assez grand» à «pour tout n ...» L'hypothèse de Riemann ne semble pas près de céder! ■

S. B.

M. Griffin et al., PNAS, en ligne le 21 mai 2019

INHUMATION DE CLAN À KOSZYCE

Il y a 4 800 ans, des agresseurs ont éclaté les crânes de 15 individus à Koszyce, en Pologne. À partir de leurs gènes, Hannes Schroeder, de l'université de Copenhague, vient de montrer que tous les défunts sauf un sont apparentés. Quatre mères ont été enterrées avec leurs enfants près d'elles. Parmi les individus mâles présents, six ont moins de 20 ans et seulement un est père. Ce tableau suggère que, de retour chez eux, les pères de famille d'un clan familial néolithique ont trouvé les leurs tués et les ont inhumés en tenant compte de leurs liens.

L'ANTIDOULEUR DES RATS-TAUPES

Le rat-taupe nu (*Heterocephalus glaber*) est célèbre pour sa résistance au cancer et à la douleur. Gary Lewin, du centre Max-Delbrück de médecine moléculaire, à Berlin, et ses collègues ont testé la résistance aux acides et à la capsaïcine (le composant actif du piment) chez plusieurs espèces apparentées. Ils ont ainsi identifié un mécanisme de suppression de la douleur impliquant un seul gène, qui code un canal ionique. Très actif chez le rat-taupe nu, ce gène empêche les neurones sensibles à la douleur de s'activer. Une voie vers de nouveaux analgésiques ?

HIKIKOMORI, QUI ES-TU ?

Les hikikomori, mot japonais désignant les individus qui restent des années durant en retrait de la vie sociale, sont le plus souvent des hommes. Ils ont souvent été déscolarisés ou ont suivi un traitement psychiatrique. C'est ce qu'ont conclu Roseline Yong et Kyoko Nomura, de l'université d'Akita, au Japon, en étudiant un échantillon de 5 000 personnes âgées de 15 à 39 ans et sélectionnées dans 200 communes japonaises.

SYMBIOSE MAGNÉTIQUE

En 1975, le biologiste britannique Richard Blakemore a découvert des bactéries magnétotactiques. Elles sont sensibles au champ magnétique terrestre grâce à des cristaux ferrimagnétiques qu'elles synthétisent dans des compartiments nanométriques de leur structure interne, nommés magnétosomes. Alors qu'ils voulaient étudier la diversité de ces bactéries, Caroline Monteil et Christopher Lefebvre, de l'institut de biosciences et biotechnologies d'Aix-Marseille, et leurs collègues ont découvert l'existence d'un microorganisme eucaryote ayant acquis une sensibilité similaire grâce à une symbiose établie avec des bactéries magnétotactiques.

Ces bactéries vivent uniquement dans les sédiments des milieux aquatiques, et surtout dans les zones pauvres en oxygène, voire qui en sont totalement dépourvues. Leurs cristaux ferrimagnétiques s'organisent sur les lignes de champ magnétique terrestre, qui sont obliques par rapport à l'horizontale. Ainsi, grâce à la magnétoréception, ces bactéries sont capables de distinguer le haut du bas (autrement que par la force de pesanteur). Elles se déplacent le long de ces lignes de champ et se dirigent plus en profondeur, là où la teneur en oxygène, plus faible, leur convient mieux.



La surface de ces eucaryotes unicellulaires est recouverte de bactéries sensibles au champ magnétique terrestre.

Lors d'observations au microscope, Caroline Monteil et ses collègues ont découvert un eucaryote (organisme aux cellules pourvues d'un noyau) unicellulaire dont la surface est recouverte de bactéries magnétotactiques. L'ensemble vit en symbiose : l'eucaryote fournit de l'énergie sous forme d'hydrogène moléculaire aux bactéries, tandis que celles-ci permettent à l'eucaryote de s'orienter dans les sédiments. C'est la première fois que l'on observe une acquisition de ce sens par symbiose chez un organisme eucaryote, une stratégie originale qui a conduit à une bonne adaptation à son milieu. ■

W. R.-P.

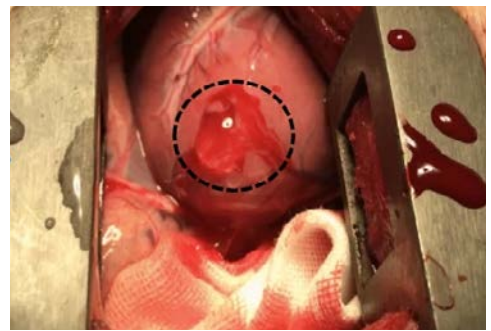
C. L. Monteil et al., *Nature Microbiology*, en ligne le 29 avril 2019

BIOCHIMIE

UN GEL CONTRE L'HÉMORRAGIE

Lors d'une hémorragie majeure, liée à la rupture d'une grosse artère ou d'une perforation cardiaque, il n'y a guère le choix : la seule méthode éprouvée est celle de la suture du vaisseau ou du cœur endommagé. Il existe aussi des gels qui colmatent les plaies, mais jusqu'à présent ceux-ci adhéraient mal aux tissus et étaient donc peu efficaces.

Yi Hong et ses collègues, de la faculté de médecine de l'université Zhejiang, en Chine, ont mis au point un gel biocompatible et biodégradable. Ils ont modifié un gel existant en conférant à ses molécules deux groupes chimiques complémentaires qui se lient en présence de lumière ultraviolette, tandis que les groupes restant non liés se fixent aux tissus. Le gel, qui a été testé *in vivo* sur des porcs, durcit, adhère aux tissus biologiques et stoppe net l'hémorragie en

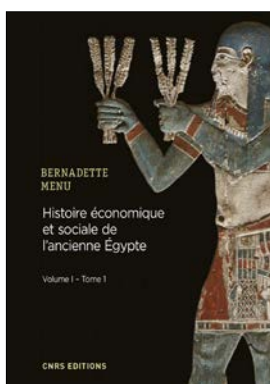
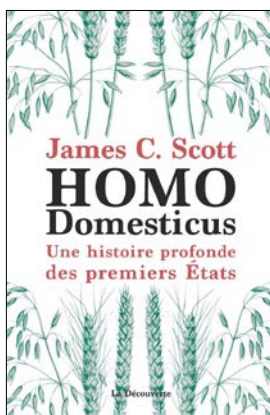
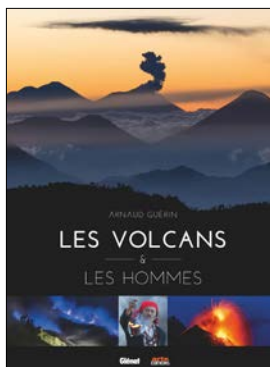
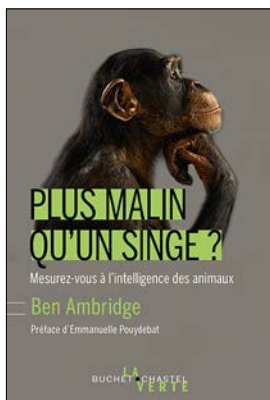


Le gel appliqué sur ce cœur de porc stoppe l'hémorragie en quelques secondes.

quelques secondes, y compris sur des plaies majeures, comme sur le cœur ou sur l'aorte. Le suivi postopératoire a montré un retour à la normale des fonctions cardiaques en moins de deux semaines et une cicatrisation déjà avancée, avec une parfaite tolérance du gel par l'organisme. ■

MARTIN TIANO

Yi Hong et al., *Nature Communications*, vol. 10, article 2060, 2019



ÉTHOLOGIE

PLUS MALIN QU'UN SINGE ?

Ben Ambridge

Buchet-Chastel, 2019
334 pages, 22 euros

Une fois n'est pas coutume : voici un livre scientifique à la fois didactique... et extrêmement amusant ! Par l'utilisation de tests et de devinettes, l'auteur nous fait comparer nos aptitudes à celles des animaux, et pas seulement à celles des singes... J'ai bien écrit « aptitudes » et non pas uniquement « intelligence », car beaucoup des comparaisons relèvent non pas de l'intelligence pure (venant du cerveau), mais plutôt d'adaptations génétiques dues à la sélection naturelle, ce qu'on pourrait appeler l'« intelligence aveugle de la nature ».

Ainsi l'allongement du cou de la girafe, le mimétisme des formes ou des couleurs qui permettent le camouflage des animaux, le décalage des cycles reproducteurs chez certains insectes afin qu'ils ne coïncident pas avec les cycles de leurs prédateurs, la localisation par sonar chez les chauves-souris, voire l'adaptation des toiles d'araignées et leurs modifications par l'administration d'agents psychotropes comme la caféine, la marijuana ou les somnifères...

Dans le domaine de l'intelligence proprement dite, des développements passionnants concernent la remarquable intelligence des chiens, la résistance des poussins aux illusions d'optique, la grande mémoire des éléphants et même des pandas, les aptitudes des grands singes, l'existence de droitiers et de gauchers dans beaucoup d'espèces, voire le fétichisme chez les cailles : des cailles mâles, dignes de Pavlov, habituées à s'accoupler avec des femelles en présence d'un tissu rouge, cherchent ensuite à s'accoupler avec le tissu lui-même !

Tous ces exemples ne mettent pas en cause la cognition humaine, mais soulignent sa parenté avec les formes multiples et surprenantes de l'intelligence animale.

GEORGES CHAPOUTHIER
NEUROBIOLOGISTE ÉMÉRITE AU CNRS

VOLCANOLOGIE

LES VOLCANS ET LES HOMMES

Arnaud Guérin

Glénat - Arte, 2019
192 pages, 35 euros

Enfin un ouvrage original, positif, qui embrasse le volcanisme et l'homme dans une approche non mortifère, sans litanie du risque et loin du catastrophisme ! Pas d'arithmétique du malheur, mais au contraire une valorisation de la symbiose vitale homme-volcan. Cela fait du bien !

Cet ouvrage est superbement illustré, facile et agréable à lire. Mieux que cela, il est didactique et limpide. L'approche iconographique et les photographies sont de l'auteur.

Le premier chapitre, « Vivre avec les volcans » (premier tiers de l'ouvrage), présente le volcanisme – pourquoi, comment, où, lave, magma, cendres et bombes... – mais aussi les geysers, les origines de la vie, les volcans en tant que sources de biodiversité et d'énergie. Une synthèse actualisée, indispensable pour recadrer la machine volcan pour les initiés comme pour le grand public.

C'est dans le second chapitre, « Histoire d'homme » (deuxième tiers de l'ouvrage), que l'auteur prend son envol. À travers un tour du monde bien choisi et original, il nous amène notamment au Japon dans les bains de sable, en Sicile dans la ferveur de Santa Agata, en France dans les entrailles de la pierre de Volvic, en Islande pour accompagner la transhumance volcanique ou la naissance et la mort de l'île de Surtsey, en Tanzanie sur le volcan sacré des Massaïs, aux États-Unis avec les chasseurs de lave d'Hawaï... Et ce, toujours avec un éclairage original et novateur. L'Indonésie est présente, avec les mineurs de soufre du Kawah Ijen et les flancs du Bromo pour les offrandes au dieu de la caldeira Tengger, lors de la fête du Kesodo. Un voyage avec les prêtres mayas sur les volcans sacrés du Guatemala complète l'approche... « chamanique » !

MICHEL DETAY
GÉOLOGUE

ANTHROPOLOGIE

HOMO DOMESTICUS

James C. Scott

La Découverte, 2019
301 pages, 23 euros

Les dix derniers millénaires ne représentent qu'à peine plus de 3% de l'existence d'*Homo sapiens*, mais ils ont été particulièrement riches en bouleversements écologiques et sociaux. L'agriculture et l'élevage ont remplacé le mode de vie des chasseurs-cueilleurs, les cités et les États sont apparus avec tout leur cortège d'innovations qui ont changé la vie... D'où l'habitude qui s'est prise de considérer ces millénaires comme ceux d'une révolution, la «révolution néolithique».

Rares sont les auteurs assez érudits pour traiter l'ensemble de cette période mouvementée avec un œil neuf. Or les découvertes récentes remettent en question l'interprétation orientée, qui était souvent donnée à cette période d'humanisation. L'auteur, professeur émérite de science politique et d'anthropologie à l'université Yale, qualifie celle-ci de période d'«autodomestication de l'animal humain»... De formidables dynamiques écologiques et anthropologiques imbriquées ont été à l'œuvre au cours de cette étape de la transformation de l'homme-animal en homme «civilisé», transformation qui a fait émerger la vie en grandes sociétés étatiques et urbaines. L'auteur réussit à les restituer avec une clarté extraordinaire dans ce volume très documenté (300 références bibliographiques). Comme le résume bien la quatrième de couverture: «Ce livre démonte implacablement le grand récit de la naissance de l'État antique comme étape cruciale de la «civilisation» humaine.»

PIERRE JOUVENTIN
ÉTHOLOGUE ÉMÉRITE AU CNRS

ÉGYPTOLOGIE

HISTOIRE ÉCONOMIQUE ET SOCIALE DE L'ANCIENNE ÉGYPTE

Bernadette Menu

CNRS Éditions, 2018
450 pages, 27 euros

Premier volume d'un panorama de l'histoire économique et sociale de l'ancienne Égypte, cet ouvrage commence tout naturellement par évoquer les fondements de l'État, antérieurement à l'unification du pays à la 1^{ère} dynastie. L'auteure, reprenant dans cette synthèse plusieurs de ses écrits précédents, n'hésite pas à employer les termes de «corpus constitutionnel» pour le dépôt provenant du royaume de Hiérakonpolis.

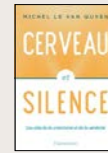
Dès cette époque se fixent les insignes et symboles de la monarchie, comme les couronnes, tandis qu'en sont établis les principes. Au cœur de l'idéologie pharaonique naissante se trouve le concept dynamique de Maât, fondement de l'ordre et du droit, comme cela ressort aussi bien des documents rituels que des écrits relatifs aux coutumes, à la jurisprudence et à la justice. La terre appartenant au roi, celui-ci délègue une part de son autorité aux temples et aux grands dignitaires.

Toute une série de documents nous informent sur la gestion du territoire: administration, cession, exploitation. Classés par catégories et par ordre chronologique, de l'Ancien Empire à la Basse-Époque, décrets officiels et contrats privés sont analysés d'un point de vue juridique. Des traductions commentées permettent d'approcher la réalité quotidienne et parfois de véritables tranches de vie.

Cet ouvrage donne un éclairage intéressant sur une société que l'on a tendance à considérer surtout d'un point de vue culturel et religieux. On attend le second tome, consacré au travail et au commerce, avec impatience!

NADINE GUILHOU
UNIVERSITÉ PAUL-VALÉRY, MONTPELLIER

ET AUSSI



L'ABEILLE ET LA RUCHE

Alain Péricard

Ecosociété, 2019
312 pages, 29 euros

Ce « Manuel d'apiculture écologique » est l'œuvre d'un journaliste scientifique québécois, « apiculteur pendant 20 ans ». Très bien servi par les illustrations de Céline Liénaux, son texte décrit les bonnes pratiques, les connaissances et toutes les habiletés nécessaires à l'apiculteur. Il fournit aussi l'occasion de découvrir la constitution et la vie de la ruche, la danse des abeilles, diverses ruches du monde, comment exploiter le miel et la cire, etc. Bref, un excellent moyen de beaucoup apprendre sur *Apis mellifera*, cette précieuse compagne de l'humanité, aujourd'hui en danger.

CERVEAU ET SILENCE

Michel Le Van Guyen

Flammarion, 2019
256 pages, 20 euros

Un neuroscientifique hyperactif se retrouve condamné au silence par les conséquences physiologiques d'un épuisement professionnel. Fulminant contre ce contretemps, il s'y résout pourtant et, stupéfait, se ressent petit à petit régénéré. Réagissant en chercheur, il passe scientifiquement en revue ici les diverses formes de silence, le silence acoustique mais aussi celui du corps, de l'attention, de la rêverie, de l'écoute, des yeux, de la méditation, le silence intérieur... Et si vous vous accordiez le silence nécessaire pour lire ce livre ?

POURQUOI LA TERRE EST RONDE

Alain Riazuelo

HumenSciences, 2019
206 pages, 16 euros

Une bonne façon de faire passer un fait scientifique est d'insister sur la façon dont on l'a établi. Au fil d'un agréable discours savant, le cosmologiste Alain Riazuelo met en œuvre ce principe en nous expliquant les mille moyens dont on peut se persuader que la Terre est ronde, et non plate comme le soutiennent des charlatans de la pensée. Ce faisant, l'auteur raconte aussi comment, au cours d'aventures de toutes sortes, on l'a mesurée, établi sa forme aplatie aux pôles, déterminé sa force gravitationnelle ou encore utilisé des fusées pour enfin observer notre planète de loin.

PARIS

JUSQU'AU 12 AOÛT 2019

Musée du Louvre
www.louvre.fr

Royaumes oubliés, de l'empire hittite aux Araméens



Entre le milieu et la fin du II^e millénaire, les Hittites constituaient, avec l'Égypte et Babylone, l'une des grandes puissances qui se disputaient la domination du Levant. Puis, vers 1200 avant notre ère et la série de bouleversements qui ont touché le Proche-Orient à cette époque, cet empire, qui s'étendait sur l'Anatolie et jusqu'à la Syrie actuelle, s'effondra. De ses ruines sont nés des royaumes néo-hittites et araméens. Le Louvre consacre

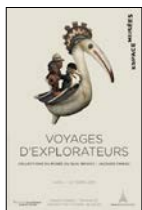
une exposition exceptionnelle et bienvenue sur cette civilisation peu connue du grand public et qui a pourtant joué un grand rôle dans l'Antiquité moyen-orientale. Parmi les nombreuses et très belles pièces présentées figurent des vestiges de Tell Halaf, site syrien majeur dont les sculptures monumentales, exposées à Berlin dès 1930 et très endommagées par les bombardements de la Seconde Guerre mondiale, ont été tout récemment restaurées. ■

AÉROPORT PARIS-CHARLES DE GAULLE

JUSQU'AU 6 OCTOBRE 2019

Aéroport Charles de Gaulle, terminal 2E, hall M
<http://espacemusees.com>

Voyages d'explorateurs



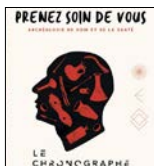
Au lieu de faire des emplettes hors taxes, les voyageurs aériens (il faut une carte d'embarquement pour accéder à cet espace d'exposition) peuvent occuper leur temps d'attente à admirer plus de 70 œuvres provenant du Musée du Quai Branly et associées à des voyages d'exploration, de tous continents et toutes époques. ■

REZÉ (LOIRE-ATLANTIQUE)

JUSQU'AU 5 JANVIER 2020

Le Chronographe
lechronographe.nantesmetropole.fr

Prenez soin de vous



Cette exposition, sur l'archéologie du soin et de la santé, cherche à montrer comment malades, blessés, infirmes étaient pris en charge par les sociétés du passé, non seulement médicalement, mais aussi socialement. Et invite les visiteurs à s'interroger sur les attitudes actuelles en matière de santé et d'accès aux soins. ■

ET AUSSI

Jusqu'à fin 2020

Cité de l'espace, Toulouse
www.cite-espace.com

LUNE, ÉPISODE II

Parmi les nombreuses célébrations du cinquantenaire des premiers pas sur la Lune, cette exposition fait revivre les exploits des missions Apollo et présente les défis actuels d'un retour des humains sur notre satellite naturel.

Mercredi 10 juillet, 19 h

Cité des Congrès, Nantes
<https://bit.ly/314mchg>

PHYSIQUE ET SECRETS DES ŒUVRES D'ART

À l'occasion du 25^e congrès général de la Société française de physique, une conférence pour le grand public de Claire Pacheco, responsable de l'accélérateur Aglae au Centre de recherche et de restauration des musées de France.

Du 11 juillet au 31 août

Quai des Arts - Cugnaux (31)
<https://bit.ly/2IfD1gB>

DRÔLES DE BUREAUX, DRÔLES DE LABOS

Bureaux imaginés par les artistes Camille et Anaïs Renversade, objets du quotidien de chercheurs, portraits de scientifiques... Un regard sur les chercheurs et leur environnement de travail.

Du 19 au 21 juillet

La Salle-les-Alpes (05)
<https://bit.ly/2JVDqIm>

FLORALIES ALPINES

Une exposition scientifique de quelque 700 espèces de plantes sauvages, qui témoignent de la biodiversité et de la grande richesse floristique des Hautes Alpes.

Samedi 27 juillet, 21 h 30

Centre d'astronomie de Saint-Michel-l'Observatoire (04)

<https://bit.ly/2wzVyPi>

NUIT DU CINÉMA DE SCIENCE-FICTION

Une nuit (8 heures...) à la belle étoile pour voir trois films : Valérian et la Cité des Mille planètes (2017), Moon (2009) et le biopic First Man (2018).

LE HAVRE

JUSQU'AU 10 NOVEMBRE 2019

Muséum d'histoire naturelle du Havre
www.museum-lehavre.fr

Abeilles, une histoire naturelle



Avec plus de 20 000 espèces connues, le groupe des abeilles est l'un des principaux acteurs de la pollinisation des plantes. Cette exposition articulée autour des belles images du photographe ~~Eric Tournet, complétées par~~ des vidéos scientifiques et d'entretiens avec des spécialistes, décrit le monde des abeilles (physiologie, vie sociale, production de miel et apiculture...), en faisant état des dernières découvertes, par exemple sur les capacités cognitives de ces insectes. À noter aussi, une série de 20 étonnantes abeilles en papier façonnées par l'artiste Hugo Boistelle. ■

PARIS

EXPOSITION PERMANENTE

Cité des sciences et de l'industrie
www.cite-sciences.fr



Robots

Sur 900 mètres carrés, la Cité des sciences et de l'industrie propose un nouvel espace permanent entièrement dévolu à la robotique, domaine en plein essor et qui suscite des interrogations justifiées, mais aussi des fantasmes. Le visiteur commencera par apprendre ce qui distingue un robot des autres machines, avant de découvrir les principes de fonctionnement. Il aura un aperçu sur la place des robots dans le monde actuel, les questions qu'ils soulèvent, et fera connaissance avec des robots de laboratoire et des robots d'exploration. ■

SORTIES DE TERRAIN

Samedi 6 juillet, 8 h
Gibeauville
(Meurthe-et-Moselle)
Tél. 06 87 40 87 08
<https://bit.ly/2XnlEkn>

PELOUSE DESSÉCHÉE

Organisée par Lorraine association nature, une déambulation de trois heures dans un milieu atypique que l'on pourrait croire dépourvu d'intérêt naturaliste – à tort.

Les 6 et 28 juillet, 6 h 30
Maison du Parc, Rosnay (36)
Tél. 02 54 28 12 13
parc-naturel-brenne.fr

LA BRENNÉ À L'AUBE

Héron pourpre, grèbe à cou noir, blongios nain... Comme les autres, ces oiseaux remarquables de la Brenne sont plus actifs, donc plus visibles, tôt le matin...

Dimanche 7 juillet, 9 h 30
Gare de Moret-Veneux-les-Sablons (Seine-et-Marne)
www.anvl.fr

PLANTES ET INSECTES EN VALLÉE DU LOING

Une sortie botanique et entomologique à la journée dans la vallée du Loing, organisée en commun par l'ANVL, les Naturalistes parisiens et le CNCE.

Mercredi 10 juillet, 21 h
Rives de Saône, Caluire-et-Cuire (69)
www.fne-aura.org

LES RIVES DE SAÔNE LA NUIT

Promenade nocturne de deux heures à la découverte des chauves-souris, castors et autres éléments de la biodiversité de milieux où se rejoignent la nature et la ville.

Samedi 20 juillet
Bagnères-de-Bigorre (65)
Tél. 09 67 03 84 07
www.naturemp.org

L'ÉTAGE ALPIN DANS LES PYRÉNÉES

Une journée de randonnée pour marcheurs aguerris, à plus de 2 200 mètres d'altitude, à la rencontre des « espèces du froid » aujourd'hui menacées par le réchauffement du climat.

PARIS

JUSQU'AU 25 AOÛT 2019

BnF François-Mitterrand
www.bnf.fr

Merveilleux scientifique

Mouvement littéraire du début du xx^e siècle impulsé par l'écrivain Maurice Renard, le « merveilleux-scientifique » profitait de l'engouement pour les découvertes et inventions de l'époque afin de construire des récits rationnels, mais fondés sur l'altération d'une loi scientifique. Les protagonistes de ces récits peuvent alors traverser la matière, lire les pensées d'autrui, explorer l'infiniment petit... Quelque 250 documents (romans, affiches, articles, feuillets...) illustrent cet imaginaire en rupture avec celui de Jules Verne et qui était précurseur de la science-fiction américaine des années 1930 et suivantes. ■

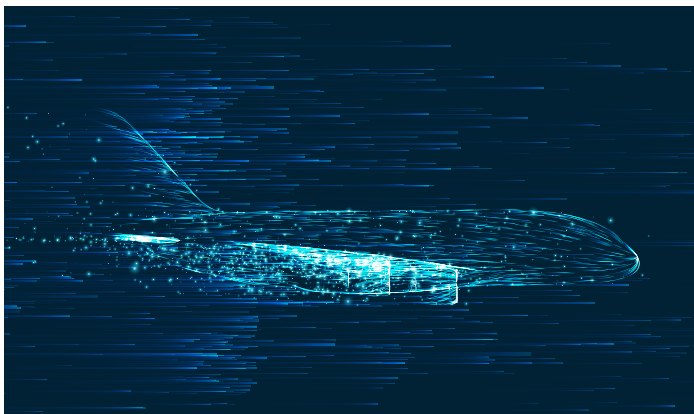




LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK

EXIGENCE STIMULANTE OU EXCESSIVE

**Vouloir que les algorithmes soient plus fiables
que les êtres humains dans la réalisation de certaines tâches,
est-ce absurde ?**



Préférez-vous
prendre un avion
avec un pilote
humain et un
risque d'accident
plus élevé ou
une machine
automatique
et un risque
plus faible ?

Quand nous envisageons de remplacer des êtres humains par des algorithmes, nous voulons, à juste titre, que ces algorithmes soient fiables et équitables. Mais nos exigences sont parfois extravagantes: nous voudrions que ces algorithmes soient parfaits, alors que les êtres humains, qu'ils sont censés remplacer, sont loin de l'être.

Un accident entre un cycliste et un véhicule autonome nous fait, par exemple, douter du bien-fondé de laisser rouler de tels véhicules sur nos routes, comme si nous ignorions que les conducteurs humains tuent, d'après l'OMS (l'Organisation mondiale de la santé), plus d'un million de personnes dans le monde chaque année. Nous sommes, de même, réticents à laisser un algorithme remplacer un juge d'application des peines, car nous craignons ses erreurs d'appréciation, alors que nous savons que les décisions des juges humains dépendent beaucoup de l'heure à laquelle elles sont rendues. Quand ils sont fatigués et qu'ils ont faim, les juges

rejetent davantage de demandes de liberté conditionnelle, induisant des variations, au cours de la journée, de plusieurs dizaines de points de pourcentage, dans la proportion des demandes acceptées.

Comment expliquer que nous soyons ainsi plus exigeants à l'égard des algorithmes et des ordinateurs que des êtres humains? Les explications les plus évidentes se fondent sur deux de nos traits

**Les conducteurs humains
tuent, chaque année, plus
d'un million de personnes
dans le monde**

de caractère: la résistance au changement et la technophobie. Nous savons, à peu près, à quoi nous en tenir avec les êtres humains: nous savons qu'ils font beaucoup d'erreurs, mais nous savons à peu près lesquelles et nous avons appris à

vivre avec. De ce fait, nous sommes peu enclins à échanger une situation, certes insatisfaisante, mais connue, pour une autre plus nouvelle.

Par ailleurs, nous pensons toujours que les objets techniques sont inflexibles et froids, alors qu'un juge humain est capable d'humanité et de compassion, même quand il nous envoie passer des années au fond d'un cachot humide. De même, plutôt qu'une voix synthétique nous annonçant qu'un accident d'avion est désormais inévitable, nous préférons un pilote humain, qui, jusqu'au bout, fera inutilement tout ce qu'il peut pour éviter cet accident.

Cette technophobie atteint parfois des sommets: un jour, à la fin d'une conférence sur l'utilisation d'algorithmes pour piloter des avions de ligne, un auditeur m'interpella, pour clamer qu'il n'accepterait jamais de voyager dans un avion sans pilote. Je lui posais alors la question de son choix face à la possibilité de voyager dans un avion avec un pilote, qui a une chance sur dix millions de s'écraser, ou alors dans un avion sans pilote, qui aurait une chance sur cent millions de s'écraser. Et sa réponse fut sans appel: il préférerait mourir dans un avion avec un pilote, plutôt que monter dans un avion sans pilote.

Mais nous pouvons aussi voir cette exigence extravagante sous un jour plus positif. Nous savons déjà, parce que nous l'avons observé, que les algorithmes conduisent les métros beaucoup mieux que les humains. Peut-être en avons-nous déjà déduit que les algorithmes feraient beaucoup mieux que nous pour piloter un avion, conduire une voiture, voire rendre un jugement impartial. Et, de même qu'un enseignant est plus exigeant avec un étudiant dont il perçoit le potentiel, peut-être sommes-nous plus exigeants à l'égard des algorithmes, parce que nous avons compris que nous pouvons l'être: parce que, même si nous savons que le risque zéro n'existe pas, nous sommes devenus si technophiles que nous voulons que ce remplacement de l'homme par la machine soit un réel progrès. ■

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

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



LA CHRONIQUE DE
VIRGINIE TOURNAY

TENTATIVE D'ÉPUISEMENT D'UN RISQUE

Une plus grande rigueur et probité des agences d'évaluation des risques sanitaires et environnementaux n'a pas assuré une meilleure confiance du public dans ces organismes.



Dans sa *Tentative d'épuisement d'un lieu parisien*, l'écrivain Georges Perec décrit la richesse inépuisable de la place Saint-Sulpice. À l'instar de l'observation attentive d'un tableau de la vie ordinaire en 1974, l'analyse intégrée de grandes bases de données rend aujourd'hui très précise la description du réel. Il en est ainsi de l'étude des mécanismes d'action des agents polluants au sein de différents écosystèmes, qui a engendré une discipline nouvelle : l'écotoxicologie.

L'expertise des risques est un bon laboratoire social pour saisir la complexité des ressorts de la confiance vis-à-vis des institutions. À l'automne 2017, l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (l'OPECST) a été saisi par les commissions des affaires économiques et des affaires européennes de l'Assemblée nationale dans le contexte médiatique agité du glyphosate. Publié en avril dernier, son rapport sur l'«Évaluation des

risques sanitaires et environnementaux par les agences» vise à trouver le chemin de la confiance.

Sa lecture met en lumière un paradoxe : alors que les garanties d'objectivité, de rigueur et d'écoute de la demande sociale concernant la maîtrise des risques ne cessent d'augmenter, la défiance à l'égard des acteurs économiques, des

Ces vingt dernières années, l'expertise des risques n'a cessé de s'institutionnaliser

scientifiques et des décideurs publics, loin de se résorber, prend au contraire une tonalité chronique.

Ces vingt dernières années, l'expertise des risques n'a cessé de s'institutionnaliser, avec le déploiement d'un réseau structuré d'agences nationales et

européennes spécialisées qui s'appuie sur des procédures très codifiées : collégialité, indépendance, transparence des intérêts des évaluateurs et des analyses produites, volonté d'adapter les cadres d'analyse aux substances – telles les perturbateurs endocriniens – dont le comportement échappe à la toxicologie classique... Ces agences sont sollicitées sur des champs de plus en plus étendus et doivent sans cesse réactualiser leurs lignes directrices face à l'exigence de mesurer les éventuels dommages non immédiats de la pollution de l'air ou de l'eau, de la radioactivité, etc.

Mais alors que les agences d'évaluation sont amenées à rendre des comptes de plus en plus précis aux citoyens, tant sur la détection des risques que sur la probité des évaluateurs, cette responsabilisation accrue ne va pas de pair avec une meilleure confiance du public. Pourquoi ?

Une expertise dont l'horizon prédictif s'allonge est confrontée à des limites tant méthodologiques qu'épistémologiques, comme le montre la difficile mesure de l'impact à long terme des pesticides sur les abeilles. De plus, avec la prise de conscience que l'association de plusieurs substances peut produire un « effet cocktail », la logique d'évaluation s'est déplacée vers une surveillance continue des signaux faibles afin de repérer les risques émergents.

Dès lors, la demande sociale de maîtrise des risques ne peut que s'accroître et incite à évaluer les produits sur une temporalité de plus en plus lointaine. La sensibilisation aux produits manufacturés peut alors se muer en une suspicion généralisée. Afin d'éviter les dérives interprétatives ou de passer à côté de risques majeurs, il est indispensable qu'une politique d'ouverture des données s'accompagne d'une culture toxicologique suffisante. Et au final, les gouvernants doivent accepter l'impératif légitime de rendre des comptes à leurs concitoyens, sans être assurés en retour d'un gain de confiance... ■

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

L'UNIVERS AVANT LE BIG BANG

- 7 dossiers rédigés par des chercheurs et des experts sur le sujet
- Une lecture adaptée sur écrans

3,99 €



Les *Thema* sont une collection de hors-séries numériques. Chaque numéro contient une sélection des meilleurs articles publiés dans *Pour la Science* sur une thématique.

Dans la collection *Thema* découvrez aussi



Pour lire votre numéro, rendez-vous dans votre compte client



boutique.pourlascience.fr/tous-les-numeros/thema.html

**MEHDI
MOUSSAÏD**

est chercheur en sciences cognitives au sein du Centre de rationalité adaptative, à l'institut Max-Planck de Berlin. Il a récemment publié *Fouloscopie* (HumenSciences, 2019), un essai où il relate tant ses premiers pas de chercheur que les dernières découvertes sur les foules.



Moins la foule est dense, plus elle est imprévisible

Comment organiser les zones urbaines pour que le trafic y soit fluide ? Comment éviter les bousculades meurtrières lors de rassemblements ? Comment lutter contre la propagation des fausses informations ? Toutes ces questions sont au cœur d'une jeune discipline, l'étude des foules, qui commence déjà à fournir des réponses. Petit tour d'horizon avec le « foulologue » Mehdi Moussaïd.

Le 24 septembre 2015, une terrible bousculade à l'entrée du pont Djamarat, à La Mecque, a entraîné près de 2 500 décès, alors que ce pont venait d'être reconstruit à la suite d'un autre mouvement de foule, en 2006, qui avait causé 362 morts. Sait-on pourquoi ces travaux n'ont pas amélioré les choses ?

Malheureusement, on a assez peu d'informations sur ce qui s'est passé ce jour-là, car les autorités saoudiennes sont très opaques sur l'accident. Jusqu'en 2006, l'entrée du pont Djamarat constituait un goulot d'étranglement. Or, en termes de gestion de foule, les goulots d'étranglement sont un enfer. Comme ce sont des endroits où les gens se massent pour passer, à l'instar d'une porte de métro, des pics de densité apparaissent à certains endroits, qui constituent alors autant de zones à risque.

A partir de quelle densité la situation devient-elle dangereuse ?

Depuis l'accident de 2006 et l'étude des films de vidéosurveillance du lieu, on sait qu'il existe des seuils de densité, notamment autour de 6 à 7 personnes par mètre carré, à partir desquels se produisent divers phénomènes collectifs. L'un d'eux, dit de turbulences, est meurtrier : des vagues de bousculades où les gens chutent et subissent des pressions impossibles à encaisser. Depuis cette étude, on recommande donc de toujours maintenir la densité en dessous de ce seuil critique. Mais c'est plus facile à dire qu'à faire : même si la foule est peu nombreuse, il suffit que tout le monde se retrouve au même endroit, comme c'est le cas autour d'un goulot d'étranglement, pour que des accidents se produisent.

À l'entrée du pont Djamarat, jusqu'en 2006, les bousculades étaient fréquentes et souvent meurtrières (comme ce fut le cas en 1994, 1998, 2001, 2003, 2004 et 2006). À partir de ces découvertes, les autorités saoudiennes ont décidé de reconstruire cet endroit pour élargir le goulot d'étranglement. Il existera toujours, car la foule doit se rendre dans un endroit précis – où l'on lapide trois piliers symbolisant Satan –, mais en l'élargissant, on a voulu réduire le risque d'accident. Et force est de constater que cela a plutôt bien fonctionné : entre 2006 et aujourd'hui, la catastrophe de 2015 demeure unique. Néanmoins, une foule reste un système chaotique dont on perd vite le contrôle. Une foule en déplacement est ainsi très difficile à gérer, surtout quand elle rassemble trois millions de personnes dans une ville aussi petite que La Mecque. En 2015, c'est probablement une combinaison de petits facteurs qui a causé l'accident.

Ces recherches sur les films de 2006 ont-elles fait émerger d'autres pistes pour améliorer les flux de foule ?

Une seconde chose effectivement très utile a changé à La Mecque après ces travaux : on a

supprimé les routes bidirectionnelles. Le nouveau pont constitue un circuit tel qu'il n'autorise le déplacement des pèlerins que dans un sens, ce qui fluidifie considérablement le trafic. À l'accident de la Love Parade de Duisbourg, en Allemagne, en 2010, ce sont des flux bidirectionnels qui ont causé l'accident : deux masses humaines arrivaient l'une vers l'autre de deux directions opposées, et le drame s'est produit à l'endroit où elles se sont rencontrées. Dans les heures qui avaient précédé l'accident, les forces de l'ordre s'étaient rendu compte que la foule était trop nombreuse (1,5 million de festivaliers) et dense et qu'elles en perdaient le contrôle. Elles avaient commencé à créer des barrières de sécurité, à rediriger la foule dans certains endroits et, à un moment, par erreur, deux flux se sont retrouvés face à face, produisant un pic de densité qui a entraîné la mort de 21 personnes.

D'une manière générale, la meilleure pratique est que l'événement soit planifié de façon quasi chirurgicale. À La Mecque, cela fonctionne bien : les pèlerins ont maintenant des tickets avec une heure de passage, ce qui permet de contrôler qui est où et à quel moment. Mais en cas d'affluence trop importante dans un festival de musique, bloquer l'entrée est une mauvaise idée : les gens s'accumuleront de l'autre côté, créant un pic de densité à cet endroit.

Que savait-on sur les foules avant 2006 ?

L'année 2006 a vraiment été charnière. Pour la première fois, les chercheurs ont eu accès à des données sur un mouvement de foule meurtrier. Ces données sont arrivées dans le laboratoire de Dirk Helbing, à l'École polytechnique fédérale de Zurich, où j'étais alors doctorant, et c'est grâce à elles qu'on a commencé à comprendre les mouvements de foule et les bousculades. En effet, on avait déjà une bonne connaissance des déplacements des foules en général, mais à une densité moindre, dans un contexte de vie quotidienne – une station de métro, par exemple. Les recherches sur les foules avaient débuté vers le milieu des années 1950, lorsque les villes commençaient à s'engorger. Des ingénieurs urbanistes voulaient comprendre comment les gens se déplacent dans les rues pour mieux adapter l'environnement urbain. Ils ont fait plein d'observations, dont une qui paraît assez intuitive aujourd'hui, sur le rapport entre densité et vitesse de déplacement des individus : plus une foule en mouvement est dense et moins les individus qui la composent se déplacent vite. Toutefois, il leur manquait un cadre théorique pour interpréter plus avant leurs observations. C'est une communauté de physiciens qui l'a apporté dans les années 1970, en particulier l'Australien Leroy Henderson, qui a eu l'idée de considérer qu'une foule dans une rue se comporte comme un liquide dans un tuyau et que l'on peut donc



Mehdi Moussaïd a récemment publié : **Fouloscopie** *Ce que la foule dit de nous* (HumenSciences, 2019).

➤ modéliser ses mouvements à l'aide de la dynamique des fluides. Cette analogie fonctionnait très bien... tant que la foule était très dense.

A quelle densité ne fonctionne-t-elle plus ?

La limite n'est pas claire, mais on peut faire un découpage grossier : à très forte densité, une foule se comporte comme un fluide. À une densité intermédiaire, ce n'est plus aussi simple. Cependant, dans les années 1990, Dirk Helbing a proposé une autre analogie, où les piétons sont des particules. Avec les fluides, le cadre théorique était celui de l'hydrodynamique. Avec les particules, c'est la mécanique newtonienne, où l'on attribue des forces de répulsion aux individus pour décrire le système (voir l'article page 32). Et quand on descend encore en densité, le modèle particulaire marche à son tour beaucoup moins bien. Il faut alors un autre cadre théorique : les sciences comportementales, principalement la psychologie et l'éthologie humaine. C'est ce que j'ai montré durant mon doctorat : dans un cadre quotidien, le modèle des piétons-particules n'a pas vraiment de sens. Il faut plutôt regarder comment les gens se comportent. C'est d'ailleurs fascinant qu'il faille ainsi passer d'une discipline à l'autre pour étudier les foules, et que cela ne dépende que de l'augmentation d'un paramètre, la densité. Au laboratoire, nous essayons justement de caractériser ces transitions et les comportements des foules dans les différents régimes.

Comment étudie-t-on le comportement d'une foule, concrètement ?

On a surtout parlé de théorie, mais la partie observationnelle est aussi très importante. On procède de deux façons. D'une part, dans la rue, en « milieu naturel ». C'est ce que j'ai beaucoup fait pendant ma thèse : on part avec une caméra et un trépied et on cherche un endroit très fréquenté, on se positionne un peu en hauteur et on filme les passants, puis, de retour au laboratoire, on suit le déplacement des gens et on regarde si les modèles reproduisent ces observations. D'autre part, on organise des expériences, certes plus artificielles, mais avec un bien meilleur contrôle sur ce qui se passe. On commence par se poser une question. Par exemple, comment se structurent deux flux de piétons qui se déplacent en sens opposé ? Et on conçoit une expérience pour y répondre. En l'occurrence, nous avons construit un couloir circulaire (cela nous permettait de maintenir les flux de piétons sans avoir à en rajouter) où nous avons placé des groupes de 30, 50 ou 60 participants. À chaque fois, une moitié avait pour instruction de tourner dans un sens, l'autre dans l'autre sens, tout en étant mélangées. Au départ, la foule était complètement désorganisée, mais après une vingtaine de secondes, elle s'autoorganisait spontanément :

une « autoroute de piétons » apparaissait, caractérisée par le fait que tous les gens qui allaient dans un même sens occupaient une moitié de l'espace disponible, tandis que l'autre moitié était réservée au sens opposé. Comme si la foule avait décidé de se partager l'espace. On peut y voir une forme d'intelligence collective : cette organisation a émergé par simples interactions successives, sans même que les gens ne s'en rendent compte, et a conduit à un bien meilleur trafic piétonnier.

Les participants privilégiaient-ils un côté ?

Oui, ils marchaient presque toujours à droite. Pour comprendre pourquoi, on a fait une autre expérience, où cette fois deux piétons se croisent dans un couloir droit. On voulait voir comment ils s'évitent. On s'est aperçu que dans cette situation, les piétons s'évitent principalement par la droite, sans même communiquer. Une sorte de règle implicite – on parle de convention sociale – facilite l'évitement entre les deux piétons. Cette règle diffère d'un pays à l'autre. Dans certains, comme la France, on s'évite par la droite ; dans d'autres, comme l'Australie ou le Japon, par la gauche. C'est ce biais d'évitement à l'échelle d'un piéton qui crée la structure de l'« autoroute » : si les piétons s'évitent par la droite, l'autoroute apparaît à droite, et inversement. Est-ce en rapport avec la façon dont roulent les voitures ? Presque toujours, mais il y a des exceptions. À Londres, les gens marchent à droite et les voitures roulent à gauche.



© Muhammad Faiz al-Hernaniz/Getty

Sait-on pourquoi ?

On a compris que la préférence d'évitement des piétons provient juste d'une habitude de notre cerveau d'apprendre à chaque expérience de la vie. Si en évitant quelqu'un par la gauche, vous lui rentrez dedans, votre cerveau retiendra qu'il faudra passer à droite la prochaine fois. Et si, en l'évitant par la droite, tout va bien, votre cerveau retiendra aussi l'information. Quand cet apprentissage, dit par renforcement, se met en place chez tous les individus en même temps de façon répétée, peu à peu, la population s'accorde sur un côté d'évitement. C'est ainsi qu'apparaissent les normes et les conventions sociales, comme le nombre de bises en fonction des régions de France. Il se trouve que le code de la route influe sur nos préférences d'évitement. C'est pour cela qu'on

suffisent à réduire la vitesse de marche de tout le monde en doublant, quel que soit le nombre de personnes sur l'autoroute de piétons.

Retrouve-t-on des comportements similaires chez les animaux ?

En effet. Quand j'étais doctorant à l'université Paul-Sabatier, à Toulouse, je travaillais dans un laboratoire d'éthologie, sous la direction de Guy Théraulaz, et mes collègues étudiaient des troupeaux de moutons, des bancs de poissons, des fourmis... Dans les colonies de fourmis, ils ont ainsi observé que se met parfois en place un trafic bidirectionnel du même ordre que celui des piétons, avec des fourmis qui quittent leur nid à la recherche d'une source de nourriture et d'autres qui ont trouvé une telle source et reviennent les mandibules chargées. Sur ces pistes de fourragement, les fourmis s'organisent elles aussi en autoroutes, avec cette fois un flux qui passe au milieu de l'autre. Les mécanismes sont un peu différents, mais la structuration collective est sensiblement la même : contrairement aux piétons, les fourmis qui vont dans un sens et celles qui vont dans l'autre ne sont pas les mêmes. Les fourmis du flux central rentrent à la fourmilière chargées de nourriture, tandis que les autres ne portent rien. On peut imaginer cette situation dans une gare : les gens qui portent une valise ont moins la possibilité de tourner et se retrouvent vers le centre, alors que ceux qui ne portent rien sont plus libres de leurs mouvements et se retrouvent sur les côtés.

Un ou deux individus plus rapides suffisent à réduire la vitesse de tous les piétons

observe une corrélation entre trafic automobile et comportement des piétons. Mais la corrélation n'est pas parfaite. En particulier, en Angleterre, qui est en quelque sorte une enclave où les véhicules roulent à gauche, entourée de pays où l'on roule à droite, il y a probablement conflit entre l'effet des pays voisins sur les piétons et l'effet des automobilistes.

Il arrive qu'un individu aille plus vite ou plus lentement. Cela a-t-il un effet sur le flux des piétons ?

Dans une foule où tout le monde s'accorde à peu près pour marcher à la même vitesse, élevée ou non, les autoroutes de piétons se mettent en place, fluidifient le trafic et tout va bien. Mais si quelques individus décident d'aller vite ou plus lentement, cela ne fonctionne plus. Ceux qui vont vite ont tendance à doubler, ce qui crée une perturbation : ils se retrouvent en face du flux opposé, lequel se scinde en deux, ce qui déclenche une réaction en chaîne qui, de proche en proche, dissout toute l'organisation. Puis l'autoroute réapparaît un peu plus tard, et disparaît à nouveau : elle devient instable, ce qui réduit la qualité du trafic. En fait, un ou deux individus

Avec toutes ces découvertes, connaît-on assez bien les foules à présent pour les modéliser de façon satisfaisante ?

On les connaît de mieux en mieux, mais jamais parfaitement. En fait, cela dépend de la question que l'on se pose. On réussit plutôt bien à modéliser le trafic piétonnier dans une ville. On sait aussi repérer les zones de danger lors d'un grand rassemblement. Mais moins la foule est dense, plus elle est imprévisible. Cela paraît paradoxal, mais c'est assez normal. Quand la foule est très dense, la liberté de mouvement de chacun est quasiment nulle. Le comportement de chaque individu devient ainsi beaucoup plus facile à prédire que dans un groupe de quelques personnes, où chacun a une grande liberté de mouvement. Les algorithmes sont ainsi très efficaces à forte densité. D'ailleurs, les entreprises comme la start-up bretonne Golaem reproduisent très bien des foules de synthèse pour des films et des séries. Golaem, par exemple, a participé à la mise en synthèse des foules des trois dernières saisons de *Game of Thrones*.

Inversement, ces modélisations vous aident-elles dans vos recherches ?

Oui, beaucoup. On fait sans cesse des allers-retours entre modélisation et observation. ▢



La foule de pèlerins qui se rassemble chaque année à La Mecque est particulièrement dense (ci-contre le 6 janvier 2006). Le 12 janvier 2006, lorsque la bousculade qui a causé 632 morts s'est produite à l'entrée du pont Djamarat, qui conduit aux trois piliers de Satan, certaines zones de cette entrée comptaient jusqu'à neuf personnes par mètre carré, soit l'équivalent de 14 personnes dans une baignoire...

Typiquement, à un moment donné, un modèle simule le monde réel. On organise alors une expérience pour tester ses prédictions. Si cela ne fonctionne pas, on modifie le modèle en conséquence et on le teste à nouveau. Dans le couloir circulaire, par exemple, le modèle prédisait que des autoroutes de piétons apparaîtraient au bout d'une vingtaine de secondes et persisteraient. De fait, dans l'expérience, les autoroutes se sont formées au moment annoncé. Sauf qu'elles se dissolvaient au bout d'un moment à cause des vitesses de marche. On ne comprenait pas ce qui posait problème. En fait, cet effet des piétons rapides ou lents n'était pas pris en compte dans le modèle. On l'a donc intégré et on a réussi à reproduire cette instabilité dans les prédictions.

Sur quoi travaillez-vous plus spécifiquement en ce moment ?

Sur la fréquence des mouvements de panique comme ceux qui se sont produits deux jours après l'attaque du Bataclan, sur la place de la République, ou le 10 juillet 2018 à Nice, sur le cours Saleya, la principale voie piétonne, pendant la retransmission d'un match de foot, ou encore le 23 mars dernier à Disneyland Paris. Le scénario est toujours le même : une fausse alerte, et tout le monde se met à fuir dans une certaine direction. Ces mouvements sont assez dangereux, car ils créent des pics de densité. On essaye de comprendre pourquoi on observe une recrudescence des mouvements de panique. C'est clairement à cause des récentes vagues d'attentats terroristes. On veut savoir combien de temps cette mémoire collective des attentats perdure avant que les mouvements de panique ne s'arrêtent. Le risque qu'il y ait un accident à cause de la foule est à mon avis plus important que celui d'un attentat terroriste.

Au regard des connaissances actuelles, quels conseils donneriez-vous pour s'en sortir dans un mouvement de foule ?

Le premier conseil est de partir avant qu'il ne soit trop tard. Souvent, on perçoit qu'on se sent mal, mais on ne voit pas le danger et on continue d'avancer. Or, à ce moment-là, il est encore temps de se faufiler pour partir. Ensuite, la majorité des victimes meurent d'asphyxie. Les premières se retrouvent le long des parois solides, où elles ne peuvent plus suivre le mouvement et sont compressées. Il faut donc éviter d'être près d'un mur ou d'un grillage. Par ailleurs, en cas de compression extrême, replier ses bras contre sa cage thoracique, comme un boxeur, peut donner quelques centimètres aux poumons pour respirer. Il est aussi important de ne pas tomber, car il est alors très difficile de se relever. Enfin, un réflexe, quand on est bousculé par ses voisins, est de les repousser. Or, d'un point de vue physique, cela a tendance

Le QI n'est pas du tout déterminant pour la performance d'un groupe

à amplifier le phénomène. Au contraire, il faut se laisser porter par la foule en tâchant, toujours, de rester sur ses jambes.

Vous vous intéressez par ailleurs à la contagion sociale, c'est-à-dire à la propagation de l'information dans une foule, en l'occurrence via les réseaux sociaux. Détecte-t-on aussi des lois ?

Oui, des modèles apparaissent depuis les années 2000, qui cherchent à anticiper si une information va se propager loin ou non, et notamment à décrire ce qui fait que telle personne partage une information et la propage. L'arrivée des réseaux sociaux a bouleversé ces recherches. On disposait soudain d'une énorme quantité de données. Au début, les chercheurs ont beaucoup utilisé Facebook, mais depuis les scandales d'intrusion dans la vie privée, l'accès aux données de ce réseau est réservé à son centre de recherche, qui ne divulgue que très peu ses résultats. En revanche, d'autres réseaux sociaux comme Twitter, où les gens cherchent à communiquer au plus grand nombre, sont publics par définition. On peut donc y étudier la propagation des informations. On s'est ainsi aperçu que dans la majorité des cas, une information ne se propage pas. À cause du flux qui submerge les utilisateurs, elle s'éteint dès son introduction sur le réseau. En revanche, quelques-unes déclenchent des cascades dont on sait reconstruire le chemin. En 2018, Soroush Vosoughi, de l'institut de technologie du Massachusetts, et ses collègues, ont ainsi montré que les vraies et fausses informations se propageaient différemment.

Ils ont collecté environ 126 000 informations tweetées par quelque 3 millions de personnes et, avec l'aide d'un site de *fact-checking*, ont séparé les vraies des fausses. Ils se sont ainsi rendu compte que les cascades de propagation diffèrent beaucoup d'une catégorie à l'autre. Celles des fausses informations ressemblent à une chaîne : plus grandes et plus longues, elles propagent plus vite l'information. Celles des vraies informations, plus petites et propageant moins vite l'information, s'apparentent plus à un émetteur, qui touche



Pour étudier les flux bidirectionnels de piétons, l'auteur et ses collègues effectuent des expériences où ils demandent à des participants de marcher dans un couloir circulaire.

plein de monde en même temps, mais de façon horizontale. Cela a permis de développer des programmes automatisés qui repèrent si une information se propage comme un mensonge ou comme une vérité. Des chercheurs essaient à présent d'affiner ces modèles pour identifier ce qui est vrai et faux, dès le début d'une cascade. On essaye aussi de comprendre comment une information se déforme.

C'est-à-dire ?

Nous nous sommes intéressés à la distorsion de l'information. Au fil de sa propagation, une information se transforme. En 2015, nous avons montré que cette distorsion n'est pas aléatoire : elle est fortement influencée par ce que pensent les gens qui transmettent l'information. L'expérience consistait à suivre la propagation d'un message, constitué d'informations neutres sur les risques et bénéfices d'un agent antibactérien très utilisé mais controversé, le triclosan, par des chaînes de bouche-à-oreille. À l'aide de questionnaires préalables, nous avons créé deux types de chaînes : les unes étaient constituées de gens ayant des préjugés contre l'industrie pharmaceutique et les produits chimiques, les autres de gens sans de tels préjugés. Résultat, dans les chaînes de gens avec des préjugés, le message devenait de plus en plus alarmant, alors qu'il devenait rassurant dans les autres. Par ailleurs, actuellement, nous nous intéressons aux chaînes de propagation qui lancent des défis, souvent dangereux, aux adolescents, et aux mécanismes de leur succès.

Cela paraît stupide. Pourtant, on parle d'intelligence des foules ?

Autant que de stupidité des foules. Quand une foule se rassemble, que ce soit physiquement ou virtuellement sur le Web, elle amplifie tout, que ce soient les émotions, les jugements ou les comportements. Comme on retient davantage les choses négatives, on a tendance à parler plus de bêtise collective que d'intelligence,

mais cela marche dans les deux sens. Demandez à une centaine de personnes la hauteur de la tour Eiffel et calculez la médiane ou la moyenne de leurs estimations, vous obtiendrez une valeur très proche de la valeur réelle. C'est un effet statistique assez facile à comprendre : si vous allez dans la rue, vous avez autant de chance de tomber sur quelqu'un qui surestimerait la valeur d'un certain écart que sur quelqu'un qui la sous-estimerait du même écart. Donc si vous interrogez plein de gens, leur répartition de part et d'autre de la bonne valeur sera équilibrée. Bien sûr, les jugements doivent être indépendants, sinon, on entre dans des phénomènes de l'ordre de la décision collective. Dans ce domaine, Anita Woolley, de l'université Carnegie-Mellon, aux États-Unis, et ses collègues, ont mené une étude fascinante en 2010. En demandant à des groupes de deux à cinq personnes de même quotient intellectuel (QI) ou de même intelligence sociale (empathie, écoute...) de réaliser diverses tâches, ils ont montré que le QI n'est pas du tout déterminant pour la performance du groupe, contrairement à l'intelligence sociale.

Peut-on évaluer le QI d'une foule ?

C'est ce que nous essayons de faire. Les tests professionnels de QI mesurent différentes facettes de notre intelligence : émotionnelle, mathématique, verbale... Nous aimerions exposer une grande foule à ce type de test et examiner si ses performances diffèrent selon la facette testée. Une foule a-t-elle, par exemple, une forte intelligence émotionnelle et une faible intelligence mathématique ? Des collègues au laboratoire travaillent sur un autre aspect passionnant : ils essaient de voir dans quelle mesure le jugement d'une foule d'étudiants en médecine peut rivaliser avec celui d'un expert pour donner un diagnostic médical. Ils ont ainsi montré que le jugement collectif des étudiants est ni meilleur ni moins bon que celui de l'expert.

Comparez-vous aussi le diagnostic de la foule étudiante avec celui d'une intelligence artificielle ?

Pas encore, mais nous ferons sûrement des expériences dans ce sens un jour. Deux formes d'intelligence émergent dans la littérature scientifique en ce moment : l'intelligence collective et l'intelligence artificielle. À chaque fois, on compare les performances de l'une ou l'autre avec celle d'un expert. Mais peut-être arrivera-t-on un jour à confronter les deux, voire à les fusionner ? La foulescopie, l'étude des foules, est une science jeune et qui avance vite. Il y a encore tout à découvrir ! ■

Propos recueillis par
Marie-Neige Cordonnier

BIBLIOGRAPHIE

S. Motsch et al., **Modeling crowd dynamics through coarse-grained data analysis**, *Math. Biosci. Eng.*, vol. 15(6), pp. 1271-1290, 2018.

S. Vosoughi et al., **The spread of true and false news online**, *Science*, vol. 359, pp. 1146-1151, 2018.

M. Moussaïd et al., **The amplification of risk in experimental diffusion chains**, *PNAS*, vol. 112(18), pp. 5631-5636, 2015.

D. Helbing et H. Z. Al-Abideen, **Dynamics of crowd disasters : An empirical study**, *Phys. Rev. E*, vol. 75, article n°046109, 2007.

L'ESSENTIEL

> La principale difficulté, quand on s'intéresse aux mouvements de foule, réside dans le caractère imprévisible des individus qui la composent.

> Néanmoins, dans certaines situations comme l'évacuation d'une salle par une sortie de secours, les modélisations fonctionnent plutôt bien.

> L'intégration à ces modèles de facteurs psychologiques dynamiques est encore balbutiante, mais le domaine est en pleine ébullition.

> Par ailleurs, avec l'accroissement des données sur les foules, l'approche par intelligence artificielle devient une autre piste prometteuse.

LES AUTEURS



BERTRAND MAURY
professeur au Département de mathématiques et applications de l'École normale supérieure (PSL Université), à Paris



SYLVAIN FAURE
ingénieur de recherche du CNRS au laboratoire de mathématiques d'Orsay



La foule en équations

Imaginez que chaque individu d'une foule soit un pion sur un échiquier, ou encore que la foule soit une goutte qui dévale une montagne le plus vite possible. En s'appuyant sur de telles analogies, des physiciens et mathématiciens ont conçu des modèles de foules performants pour décrire l'évacuation d'un bâtiment ou le transit de passagers dans une gare.



En juillet 2013, un lâcher de taureaux à Pampelune lors des fêtes de San Fermin a mal tourné à cause d'un mouvement de foule mal canalisé.

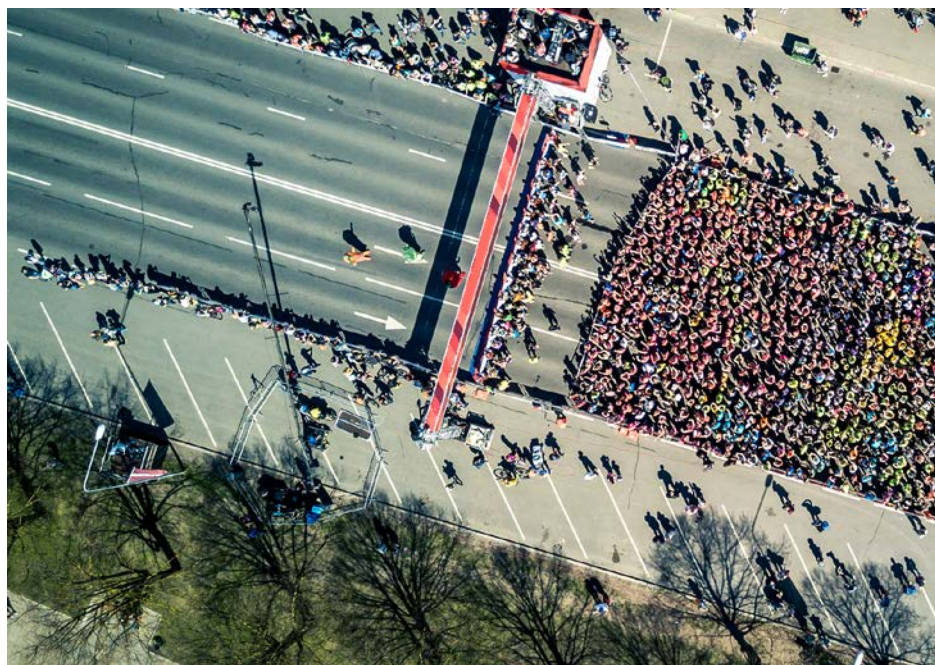
Pampelune, 13 juillet 2013. Comme tous les jours pendant les fêtes de San Fermin, la journée commence par un lâcher de taureaux à travers la ville. Des coureurs volontaires précèdent les animaux, qui avancent à vive allure. Le parcours s'étale sur un petit kilomètre et finit aux arènes, où les taureaux seront combattus. Ce jour-là, cependant, un bouchon humain se forme brusquement devant l'accès aux arènes, piégeant des dizaines de personnes au fond de la ruelle qui y mène. Malgré un accès large de quelques mètres, les acteurs involontaires de ce drame se retrouvent si inextricablement imbriqués que tout effort pour forcer le passage semble contribuer à solidifier l'assemblage apparu spontanément. Bilan: 23 blessés, dont certains gravement.

Il arrive malheureusement aussi que de tels mouvements de foule liés à un goulot d'étranglement soient meurtriers, comme ceux qui se sont produits à l'entrée du pont Djamarat, à La Mecque, encore en 2015, ou sur un pont de Phnom Penh, au Cambodge, en 2010, ou encore à la Love Parade de Duisbourg, en Allemagne, la même année.

Ces dernières décennies, en grande partie pour mieux comprendre ces événements et les éviter, pour assurer la sécurité des personnes dans les lieux fermés (faciliter, par exemple, l'évacuation rapide des bâtiments) et ouverts, comme La Mecque, ou lors de manifestations sportives, culturelles ou politiques, l'étude et la modélisation des foules se sont considérablement développées. Pour appréhender cette matière active très particulière, physiciens, mathématiciens, informaticiens, sociologues, psychologues et éthologues travaillent de concert. Et ces efforts commencent à porter leurs fruits. Aujourd'hui, la modélisation des mouvements de foule intervient dans de nombreux domaines: conception de bâtiments, anticipation de fortes congestions dans les lieux recevant du public, calculs prédictifs de temps d'attente, et jusqu'à la création de scènes virtuelles dynamiques dans les jeux vidéo, les films et les séries.

DES PARTICULES AUX PIÉTONS

Vue de haut, une foule ressemble à un amas de petits grains. Il est alors tentant de considérer les personnes comme un système de particules, surtout quand on est mathématicien ou physicien. En effet, pendant des siècles, les scientifiques ont cherché à comprendre et prédire le mouvement de particules, et les progrès dans le domaine ont été considérables. Le déclic a été la formalisation, au XVII^e siècle, des lois de la mécanique classique par Isaac Newton. Grâce à ces lois très générales, on sait écrire l'équation qui donne



Le départ d'un marathon s'effectue en plusieurs fois. Chaque cohorte de coureurs s'avance à son tour sur la ligne, comme le ferait de l'eau dans un robinet que l'on ouvre et ferme par intermittence.

la position au cours du temps d'une particule soumise à des forces extérieures, ou encore les équations d'un système de particules en interaction, qu'il s'agisse de minuscules grains solides à peine visibles ou de planètes en interaction gravitationnelle.

Certes, les systèmes obtenus à partir de ces lois sont parfois d'une complexité telle qu'il est très difficile de les utiliser pour prédire avec précision le mouvement d'une collection importante de particules. Mais cette difficulté ne remet pas en question la validité des lois de Newton, que l'on utilise ainsi dans de nombreux domaines. Par exemple, ce sont ces mêmes lois fondamentales qui donnent les équations régissant le mouvement de fluides comme l'eau ou l'air. Là encore, ces équations décrivent une réalité extrêmement complexe

La foule serait une goutte dévalant une colline suivant la ligne de plus grande pente



GARDER SES DISTANCES

Tout individu a tendance à maintenir autour de lui une zone de sécurité. Les premiers travaux scientifiques d'ampleur pour formaliser cette tendance et, plus généralement, la façon dont on appréhende son environnement immédiat, remontent au début des années 1950. C'est à cette époque que Heini Hediger, à la fois biologiste et directeur de zoo en Suisse, a estimé précisément la taille de la zone virtuelle considérée par un animal comme « son » espace. L'aspect le plus spectaculaire de ces travaux est sans doute la précision avec laquelle certains animaux – les fauves, par exemple – ont conscience de cette zone d'intimité. Heini Hediger a mis en évidence que le déclenchement d'une réaction de fuite ou d'attaque dépend de la position d'un intrus à quelques centimètres près. Quelques années plus tard, l'anthropologue américain Edward Hall a étendu cette approche aux humains. Il a mis en évidence de façon quantifiée la tendance à maintenir une certaine distance avec son voisin ou interlocuteur, très reproductible d'un individu à l'autre au sein d'un même

groupe culturel. Cette distance dépend essentiellement du degré d'intimité entre les personnes et de leur statut social. Edward Hall rapporte ainsi qu'en 1960 John Kennedy se trouvait dans une grande pièce où il avait l'habitude de retrouver ses proches et diverses personnalités influentes. La rumeur fraîchement propagée dans l'assistance qu'il était destiné à devenir le prochain président des États-Unis conduisit à l'émergence d'une zone de vide autour de lui, d'un rayon d'une dizaine de mètres. Les personnes présentes, pourtant habituées à un contact direct et chaleureux avec le jeune sénateur, ne se sentaient autorisées à franchir la limite de cette zone fictive que sur invitation expresse du futur président lui-même.
B. M et S. F.

et instable, mais leur résolution sur ordinateur est possible. C'est elle qui fournit les prédictions météorologiques auxquelles nous sommes maintenant habitués.

Bref, quand on est mathématicien ou physicien, considérer les individus d'une foule comme des particules est finalement assez naturel. Mais peut-on réellement le faire? En d'autres termes, existe-t-il des lois fondamentales qui régissent le mouvement de ces personnes, comme les lois de Newton pour les particules passives? L'honnêteté intellectuelle force à répondre négativement: la connaissance à un instant donné de la position et de la vitesse de tous les individus d'une foule isolée du reste du monde ne permet manifestement pas de prédire le mouvement futur de ses membres. Aucun observateur extérieur, fût-il Isaac Newton, n'est capable de prédire le demi-tour soudain d'une personne qui se rappelle brusquement qu'elle a oublié son agenda au bureau et rebrousse chemin. Néanmoins, dans certaines situations, il est possible de modéliser le mouvement d'ensemble d'une foule. Bien sûr, de telles modélisations nécessitent de faire des approximations sur le devenir de chaque individu, mais si celles-ci sont judicieuses, elles ne nuisent pas trop à la prédiction du mouvement d'ensemble. Reste à trouver les bons paramètres...

On construit un modèle comme on élabore une recette de cuisine. On choisit les ingrédients, les paramètres qui vont conditionner la qualité gustative du résultat (temps de cuisson, de repos, finesse de la découpe...), et la façon

dont on intègre et combine ces ingrédients. Dans le cas de la modélisation de foules, les ingrédients de base sont les lois élémentaires qui régissent le mouvement d'un individu donné en interaction avec son entourage immédiat (tel qu'il le perçoit).

Le premier ingrédient, commun à tous les modèles, consiste à définir une tendance individuelle, ou « vitesse souhaitée ». Pour une évacuation de bâtiment, on considère par exemple que tout individu aura tendance à suivre le plus court chemin vers la sortie, à une certaine allure, ce qui définit sans ambiguïté la vitesse souhaitée de chacun en fonction de l'endroit où il est.

Le deuxième ingrédient, essentiel, porte sur la description de qui se passe lorsque deux individus sont proches l'un de l'autre. Tant de facteurs psychologiques individuels et socio-culturels régissent ces interactions qu'il est difficile d'ériger une loi valide pour toutes les paires d'individus. Néanmoins, les chercheurs s'entendent pour considérer que, en général, chaque individu a tendance à se maintenir, autant que possible, à une certaine distance de ses voisins, distance qui dépend essentiellement du degré d'intimité entre les deux individus concernés (*voir l'encadré ci-dessus*).

Une fois les ingrédients rassemblés, il s'agit de choisir un cadre dans lequel les incorporer. En général, ce cadre est fourni par une analogie avec un système physique ou mathématique déjà bien décrit. Dans le cas des

Des foules, des physiciens et des mathématiciens ont proposé plusieurs approches ces dernières décennies. Dans certaines, dites microscopiques, on suit individuellement toutes les personnes, qui sont de fait identifiées à des particules (mais aux propriétés particulières, données par nos deux ingrédients). Dans d'autres, dites macroscopiques, on décrit la foule comme un continuum – un liquide qui s'écoule et se déforme sous l'action de forces externes et internes.

PRENDRE EN COMPTE LES FORCES SOCIALES

C'est un physicien allemand, Dirk Helbing, à l'École polytechnique fédérale de Zurich, qui, en 1995, a proposé le premier modèle mathématique de foule – qui était aussi le premier modèle microscopique de foule. Dans les années 1970, le physicien australien Leroy Henderson avait eu l'idée de décrire les flux de piétons dans une rue à l'aide de la mécanique des fluides, et cette analogie avait enthousiasmé la communauté de physiciens qui s'intéressaient au sujet. De fait, elle fonctionne particulièrement bien pour les mouvements simples de foule assez dense – une manifestation dans les rues d'une ville, par exemple, ou même les déplacements des coureurs au départ d'un marathon, comme l'ont montré il y a quelques mois Nicolas Bain et Denis Bartolo, de l'École normale supérieure de Lyon.

Au début de plusieurs marathons, les deux physiciens ont filmé du dessus la zone où des cordons d'organiseurs guident les coureurs



AUTOMATE CELLULAIRE

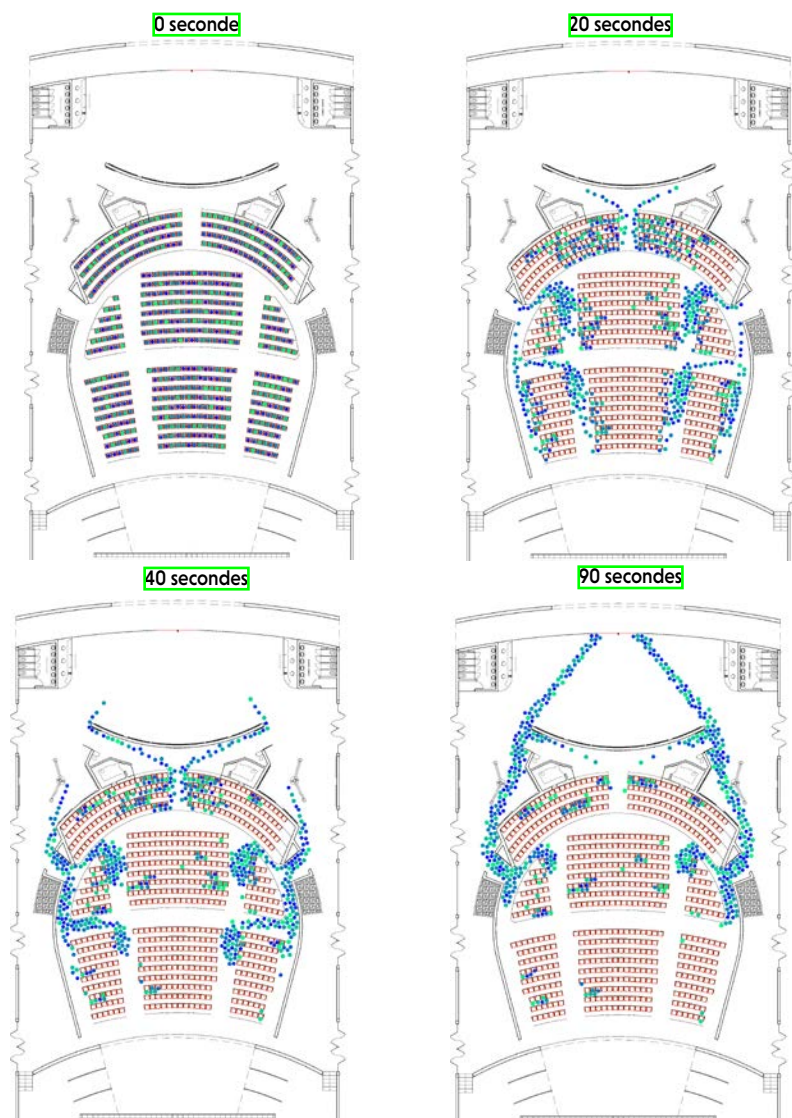
Dans les modèles d'automate cellulaire, chaque individu de la foule est représenté par un pion qui se déplace sur un quadrillage selon certaines règles. Dans le cas d'une évacuation vers une sortie, par exemple, un pion a une plus grande probabilité d'aller sur une case qui le rapproche de la sortie, mais il lui est impossible d'accéder à une case occupée. Ci-contre, deux instants d'une simulation d'évacuation (en haut), ainsi que les trajectoires de chacun des pions-individus (en bas).

jusqu'à la ligne de départ. Ce dernier ayant lieu en plusieurs fois, chaque cohorte de participants se retrouve à effectuer une séquence de marche et d'arrêt. En effectuant une analyse détaillée de la façon dont la densité de coureurs évolue, les deux physiciens ont validé avec une grande précision un modèle hydrodynamique de foule polarisée (c'est-à-dire où tous les individus vont dans la même direction) qui prédit notamment la propagation des ondes d'arrêt et de remise en marche observée vers l'arrière de chaque cohorte (voir la figure page 34).

Cependant, en général, l'analogie avec les fluides a des limites quand il s'agit de modéliser une foule non polarisée, car elle ne prend en compte que la foule dans son ensemble, et non les individus. En 1995, déjà conscient de cette difficulté, Dirk Helbing réfléchissait à une autre analogie intégrant les comportements individuels. Il a ainsi cherché à construire pour les piétons un formalisme microscopique, proche de celui de Newton : les personnes seraient des particules de masse non nulle, comme des billes, soumises à l'action de deux types de forces. Un premier type encodait la tendance de l'individu à adopter sa vitesse souhaitée, et l'autre type correspondrait à l'ensemble des forces exercées par les autres individus, nommées « forces sociales ». Dans une situation d'évacuation, la foule se comporterait ainsi comme un ensemble de billes sur un plateau horizontal, qui subiraient à la fois une forte attraction vers un même trou (la sortie) et des forces de répulsion entre billes voisines, reproduisant la tendance des individus à se maintenir à une certaine distance de leurs semblables. Cette approche est toujours utilisée dans nombre de logiciels commerciaux destinés à modéliser les flux de foules dans des stades, gares ou aéroports.

LA PISTE DE L'AUTOMATE CELLULAIRE

Un autre modèle également très utilisé est celui de l'automate cellulaire, proposé en 2001 par Carsten Burstedde et ses collègues à l'université de Cologne, en Allemagne. Il consiste à représenter la zone d'intérêt sous la forme d'un quadrillage régulier, dont les carrés ont des côtés de l'ordre de 40 centimètres, de sorte que chaque cellule ne puisse accueillir qu'une seule personne. Des « pions » disposés sur ce quadrillage (un pion au maximum par case) modélisent les personnes. Dans la forme la plus rudimentaire du modèle, chaque pion tire au hasard, à chaque étape, une position parmi les cases voisines. La tendance de l'individu est prise en compte en affectant une plus grande probabilité aux cases les plus proches de la sortie, et l'interaction avec les autres est simplement encodée par l'impossibilité



MODELE GRANULAIRE

Ce modèle fonctionne bien pour modéliser l'évacuation d'un théâtre (ci-dessus plusieurs étapes d'une telle simulation).

On considère que l'ensemble des paramètres qui décrivent les positions de chaque spectateur forme une sorte de goutte qui à chaque instant cherche à dévaler le plus efficacement possible une pente dans un paysage multidimensionnel, donnée par la somme des distances de chacun à la sortie et les diverses contraintes du lieu.

d'accéder à une case déjà occupée (voir la figure page ci-contre). Un avantage de ce modèle est sa simplicité conceptuelle et de mise en œuvre. Cependant, le quadrillage limite son réalisme, de même que le traitement des interactions entre piétons, assez succinct.

Il y a une dizaine d'années, avec Juliette Venel, alors doctorante au laboratoire, nous avons par ailleurs proposé une nouvelle approche, que nous continuons de développer. Cette approche est fondée sur un principe très général – le « flot de gradient » –, qui décrit, par exemple, le mouvement d'une goutte d'eau qui dévalerait une colline en suivant à chaque instant la ligne de plus grande pente. Mathématiquement, on suit la position de la goutte sur une carte au cours du temps (il s'agit donc d'un point dans le plan), et l'on représente l'altitude sur ce plan par une fonction de cette position (tout comme, sur Terre, l'altitude est une fonction de la longitude et de la latitude). À chaque instant, la goutte tend à diminuer au maximum son altitude, et donc à trouver, dans son environnement, la

position où la pente de la fonction altitude est la plus grande (cette pente n'est autre que le gradient de la fonction, c'est-à-dire en l'occurrence la dérivée de la fonction par rapport à la position, d'où le nom du principe).

UNE « GOUTTE » DE FOULE

Pour une foule, la « goutte » est l'ensemble des paramètres décrivant les positions des personnes impliquées, et la modélisation repose alors entièrement sur la définition d'une quantité qui jouerait le rôle de l'altitude et que la foule tendrait à réduire. Dans le cas d'une évacuation, il est très naturel de définir cette quantité comme une insatisfaction globale, plus précisément comme la somme des distances des personnes à la sortie, à laquelle on ajoute des termes qui prennent en compte les interactions. Un terme, notamment, atteint de très grandes valeurs lorsque deux personnes commencent à se chevaucher, ce que les lois de la physique classique (et la décence) interdisent. Une fois que la quantité à minimiser est bien définie, il est assez facile de laisser la foule, identifiée maintenant à un point unique dans un espace de grande dimension, glisser le long de ce paysage virtuel. Du fait de l'interdiction stricte des chevauchements, ce modèle décrit la foule comme une collection de grains rigides, et l'on parle ainsi de modèle granulaire.

Malgré leur caractère assez rudimentaire en termes de prise en compte du comportement humain, ces différents modèles offrent une description assez correcte du mouvement de foules dans de multiples situations, en particulier lorsque les tendances individuelles sont bien maîtrisées : files d'attente, croisement de flux, évacuation à travers une sortie étroite... Cette dernière situation – un cas d'étude classique – est souvent utilisée pour évaluer le comportement d'un modèle dans des cas de forte densité. À l'aide d'expériences très documentées, on compare les résultats du calcul avec les données expérimentales. Pour chacun des modèles microscopiques décrits ci-dessus, diverses équipes ont ainsi retrouvé les caractéristiques expérimentales avec une bonne précision, jusqu'aux propriétés statistiques fines vérifiées par la distribution des temps entre deux sorties successives d'individus.

Dans ce contexte particulier de l'évacuation à travers une sortie étroite, certains phénomènes excitent actuellement la curiosité des scientifiques. Parmi eux, l'effet *faster is slower*, que plusieurs équipes ont étudié à partir des années 2000, joue un rôle central. Dans des situations d'évacuation d'urgence, on observe qu'une trop grande précipitation des individus conduit parfois à un ralentissement de la foule dans son ensemble, voire au blocage de la sortie de secours. Une forme spectaculaire et d'une

▢ certaine manière inversée de ce phénomène est l'accélération que l'on observe dans certaines situations à la suite de l'ajout d'un obstacle en amont de la sortie (*voir la figure page ci-contre*). La parenté entre les deux phénomènes est claire: l'obstacle tend à ralentir certaines personnes et conduit pourtant à une accélération de l'évacuation (*effet slower is faster*). Diverses équipes ont exploré expérimentalement ce phénomène dans les années 2000, tant avec des piétons qu'avec des animaux, notamment des moutons.

Ce type d'effet paradoxal apparaît dans de multiples domaines et n'est pas restreint aux mouvements collectifs. Ainsi, la loi dite de Yerkes-Dodson décrit une amélioration des performances d'un individu lorsque son niveau de stress augmente, jusqu'à un certain seuil au-delà duquel le stress devient contre-productif. La physique des objets ou substances non vivantes regorge aussi d'exemples de tels phénomènes. Des physiciens ont ainsi établi qu'une goutte de fluide visqueux qui dévale une pente à la surface rugueuse est susceptible d'être ralentie par une augmentation de la gravité: la gravité déforme et écrase la goutte, agrandissant ainsi la taille de la zone de friction.

MODÉLISER LA FRICTION ENTRE INDIVIDUS

Cet exemple simple n'est peut-être pas si éloigné de la foule, une fois de plus assimilée à une goutte dévalant une pente. De fait, la plupart des modèles décrits précédemment reproduisent cet effet sous réserve d'introduire une part de friction dans les interactions. Comment procède-t-on concrètement? Prenons le modèle de l'automate cellulaire. L'idée consiste simplement à tirer au sort, pour chacun des individus identifiés à un pion sur le quadrillage, la case sur laquelle il souhaite atterrir, sans tenir compte des mouvements des autres. Cette première étape conduit parfois à des conflits où deux personnes se disputent la même case. Pour modéliser la friction entre individus, on décide qu'en cas de conflit, il existe une probabilité non nulle (ce nombre entre 0 et 1 est un paramètre essentiel du modèle) que personne ne l'emporte, c'est-à-dire que les deux (voire trois) compétiteurs soient renvoyés à leur position initiale. On comprend bien alors qu'augmenter la propension des individus à avancer coûte que coûte accroîtra le nombre de conflits, et ralentira donc la foule. De fait, cette approche de l'automate cellulaire reproduit l'effet *faster is slower* de façon satisfaisante.

Un débat subsiste pourtant sur les causes principales de ce phénomène. En effet, le modèle granulaire du flot de gradient n'inclut aucun ingrédient de type friction. Or il

SOURIEZ, VOUS ÊTES SUIVI

Les moyens de suivre les foules dans leur mouvement ont considérablement évolué ces dernières décennies. Si le comptage manuel est encore pratiqué dans certaines circonstances, on utilise de plus en plus des capteurs de flux. Ces capteurs fonctionnent selon un principe simple: une caméra à la verticale de la zone couverte enregistre un flux vidéo, qui est analysé en temps réel pour compter les personnes qui passent dans un sens ou dans l'autre au travers d'une ligne virtuelle prescrite par l'utilisateur. De nouveaux modèles 3D, équipés de deux caméras, construisent même une carte de hauteur (exactement comme nos yeux nous

permettent d'évaluer la distance à l'objet regardé), laquelle assure finesse et robustesse au comptage en permettant de distinguer les enfants de leurs parents, ainsi que les bagages et objets divers.

En mécanique des

fluides, une telle approche est dite eulérienne: elle donne des informations au cours du temps en un point fixe de l'espace, qui correspondent à des individus différents. Mais grâce aux nouvelles technologies, on accède aussi à présent à des informations de nature lagrangienne, c'est-à-dire afférentes à une personne donnée qui se déplace. Le smartphone que chacun emporte avec lui est localisé en permanence grâce aux fonctionnalités GPS, complétées par les accès automatiques aux bornes Wifi présentes dans l'entourage. Cette localisation est certes défaillante lorsque la personne se trouve au sein d'un bâtiment, mais en installant de petites balises Bluetooth (*beacon*) dans celui-ci, on recouvre la capacité de localisation à quelques mètres près. Si l'acquisition de la position est régulière (toutes les 10 ou 20 secondes), il est possible de reconstruire la trajectoire d'une personne et donc de savoir où elle s'est attardée, voire d'en déduire ses centres d'intérêt et certains aspects de son mode de vie.

Ce type de fonctionnalité

est extrêmement contrôlé, en France en particulier: un tel suivi ne peut se faire que sous la condition de l'anonymat le plus strict. Le caractère lagrangien du suivi reste en revanche assuré, au moins pendant quelques jours, par la connaissance d'un identifiant associé au smartphone, et donc à la personne qui le possède, mais sans que son nom puisse être connu ni a fortiori stocké avec les autres informations.
B. M. et S. F.

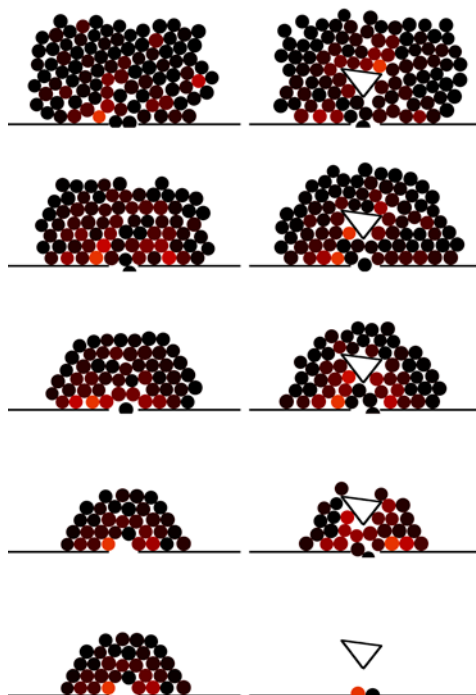


reproduit cet effet et en fournit une explication plausible si l'on se concentre sur le rôle fluidifiant d'un obstacle. Reprenons l'image d'une goutte dévalant une pente, qui se retrouve coincée dans un petit trou présent sur son parcours. Si, sur ce parcours, l'on rajoute un obstacle bien profilé en amont du trou et si la goutte recommence alors sa course, l'obstacle la force cette fois à contourner le trou et lui permet ainsi de poursuivre son chemin vers la vallée. La goutte coincée au fond de son trou correspond à un bouchon de la foule en amont de la sortie, et l'obstacle évite les pièges de ce type.

▢ On se retrouve donc avec deux modèles l'automate cellulaire et le modèle

« FASTER IS SLOWER » ET INVERSEMENT

Quand une foule se presse vers une sortie, les contraintes sont telles à l'abord de l'ouverture que l'évacuation ralentit, ou même se bloque (voir la séquence à gauche, effectuée en utilisant le modèle granulaire, où plus une bille est rouge, plus elle subit de pression de ses voisines) – un effet connu sous le nom de *faster is slower*. En revanche, lorsque l'on place un obstacle devant la sortie, l'écoulement est bien plus efficace (à droite).



granulaire – qui reproduisent chacun ce phénomène paradoxal tout en étant fondés sur des ingrédients très différents. Cet exemple illustre une difficulté essentielle de la démarche de modélisation en général: il ne suffit pas de reproduire un effet pour être certain d'en avoir identifié les causes...

Ces dernières années, la science encore jeune de la modélisation des mouvements de foule a connu des succès spectaculaires et s'étend peu à peu à toutes sortes de domaines. Le modèle de forces sociales est intégré à des logiciels commerciaux utilisés par exemple pour modéliser les flux de touristes sous la tour Eiffel ou le mouvement des passagers dans les grands centres de transit. Il est aussi de plus en plus fréquent que la conception d'un projet architectural s'accompagne de la simulation des flux piétonniers à travers des espaces non encore construits. L'utilisation de ces modèles pour obtenir un rendu plus réaliste des mouvements de personnages de films ou de jeux vidéo s'est par ailleurs généralisée: les scènes de bataille du *Seigneur des Anneaux* et de *Game of Thrones*, par exemple, impliquant un nombre considérable d'entités dotées de capacités cognitives proches des nôtres, ont été réalisées à l'aide de modèles particuliers de foules.

Remarquons que, dans tous les exemples cités, les tendances spontanées des individus étaient assez simples à décrire, soit prévisibles dans le cas de l'évacuation d'un bâtiment ou du transit de passagers dans une gare, soit issues d'un scénario préétabli pour les films d'animation. Dans des situations plus générales, qui mélangent des individus aux tendances multiples et aux modalités d'interaction complexes,

les modèles actuels présentent des limites et les défis à relever sont nombreux.

En premier lieu, l'intégration à ces modèles de facteurs psychologiques dynamiques reste balbutiante. Un pétard qui explose au sein d'une foule dense peut entraîner un mouvement de panique qu'il est très difficile d'appréhender à l'heure actuelle. La notion même de panique à l'échelle d'un individu n'est pas clairement définie, son apparition et son évolution variant très fortement d'un individu à l'autre et les modalités de sa propagation au sein d'une foule dense étant mal connues. À partir des modèles, il est certes possible de reproduire *a posteriori* un mouvement de panique qui a été filmé, mais élaborer un modèle général de mouvement qui prédirait ce qui se passerait pour un large spectre de situations de ce type est actuellement hors de portée.

DU PIÉTON À LA THÉORIE DES JEUX

En second lieu, l'interaction des individus avec un milieu potentiellement hostile nécessite de coupler ces modèles avec d'autres variables, par exemple un niveau de visibilité conditionné par la présence de fumée en cas d'incendie. Enfin, la capacité de chacun à développer des stratégies fines d'évitement et d'optimisation des trajectoires, sans même en avoir conscience, est délicate à mettre en équations. Chaque individu élabore, pour les secondes à venir, un projet de trajectoire fondé sur son intuition de ce que les autres piétons feront. Le comportement effectif résulte donc d'un processus de négociation plus ou moins conscient, dont certains aspects relèvent de la théorie des jeux: le gain consécutif à un choix de stratégie dépend des choix des autres. Il est à prévoir que les travaux déjà entamés vers l'élaboration de modèles intégrant ces aspects se multiplieront ces prochaines années et permettront d'affiner le caractère prédictif des modélisations.

Par ailleurs, l'accroissement récent et considérable de la masse de données que l'on acquiert sur les mouvements de personnes (voir l'encadré page ci-contre) ouvre la voie à d'autres approches de modélisation, non plus fondées sur la formalisation de phénomènes bien identifiés, mais pilotées par les données. Malgré le caractère un peu frustrant pour le scientifique de s'éloigner d'une logique phénoménologique et causale, ces approches naissantes, fondées sur des techniques d'apprentissage profond, ont un potentiel prédictif considérable et devraient bouleverser prochainement ce domaine déjà en pleine ébullition. Dans les années à venir, il n'est pas exclu que se généralise comme nous en avons pris l'habitude pour le trafic routier, une « météo des foules » qui nous donnerait des indications sur le niveau de congestion attendu zone par zone, à l'échelle d'une ville. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Moussaïd, **Fouloscopie : Ce que la foule dit de nous**, HumenSciences, 2019.

N. Bain et D. Bartolo, **Dynamic response and hydrodynamics of polarized crowds**, Science, vol. 363, pp. 46-49, 2019.

B. Maury et S. Faure, **Crowds in Equations**, World Scientific Publishing Europe Ltd., 2018.

D. Helbing et P. Molnár, **Social force model for pedestrian dynamics**, Phys. Rev E, vol. 51, pp. 4282-4286, 1995.

Un petit pas qui a 50 ans

L'anniversaire de la mission *Apollo 11* est l'occasion de revenir sur cet exploit que l'on pensait quasi impossible à l'époque. Avec l'émergence de nouveaux projets, nous pourrions revivre une aventure similaire dans les années à venir.





L'AUTEURE



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

L'empreinte de la botte
de Buzz Aldrin s'est imprimée
de façon très nette dans la poudre
qui recouvre le sol lunaire.



Neil Armstrong salue le photographe tandis qu'il se dirige, avec ses coéquipiers, vers le pas de tir.

George Low, responsable du programme des missions Apollo, suit avec ses collègues la progression des astronautes depuis la salle de contrôle des opérations.



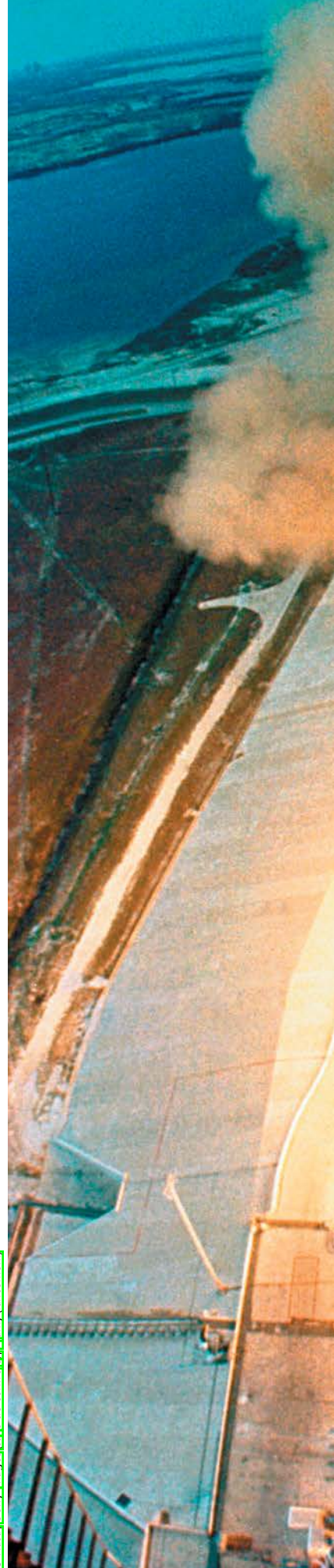
Neil Armstrong pensait qu'il avait une chance sur deux d'aller au bout de cette mission. « Il y avait tellement d'inconnues, » a expliqué, en 2011, le premier homme à poser le pied sur la Lune. « La probabilité était forte qu'un événement que nous n'avions pas anticipé survienne, ce qui nous aurait obligés à annuler la mission et à rentrer sur Terre sans nous poser sur la Lune. » Malgré ces incertitudes, Neil Armstrong, Edwin « Buzz » Aldrin et Michael Collins – avec l'aide de milliers d'ingénieurs, scientifiques et opérateurs sur Terre – ont accompli l'un des exploits les plus incroyables de l'humanité.

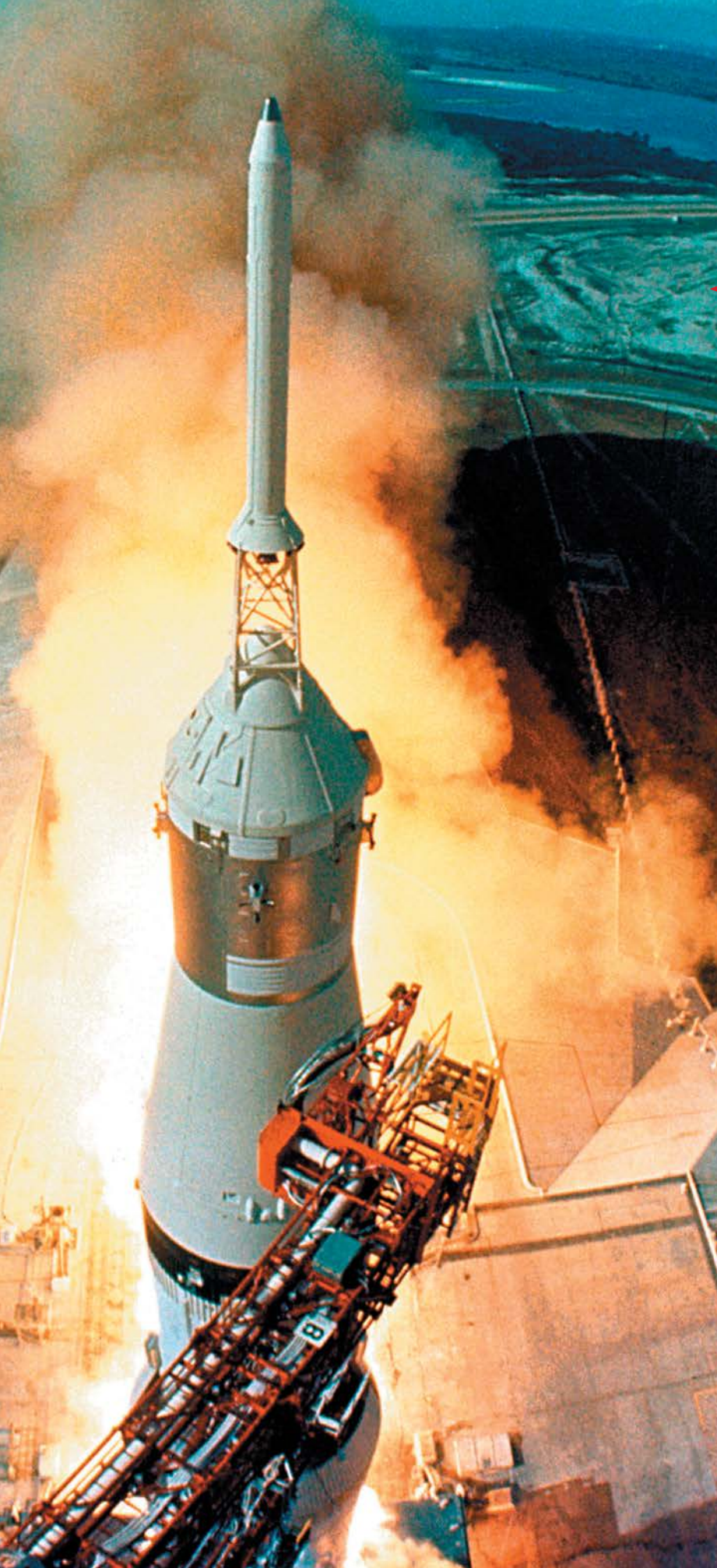
Il y a tout juste 50 ans, avec à son bord les trois astronautes, une fusée *Saturn V*, haute

comme 36 étages et pesant le poids d'environ 400 éléphants, s'est propulsée loin de la Terre dans une explosion plus puissante que la production de 85 grands barrages hydrauliques.

Une fois dans l'espace, les astronautes ont échappé à l'orbite terrestre pour rejoindre celle de la Lune. Ils ont alors décroché une partie de leur vaisseau et l'ont dirigée vers le sol lunaire, où ils ont atterri en douceur. Peut-être plus impressionnant, après avoir marché sur ce monde étranger, ils sont remontés dans le module lunaire et ont décollé de la surface de cet autre corps céleste (également une première) pour rejoindre le module principal qui les attendait en orbite, 90 kilomètres au-dessus de leurs têtes. Puis ils sont rentrés sur Terre, en terminant leur voyage par un plongeon dans les eaux de l'océan Pacifique.

© Nasa, Getty Images, la salle de contrôle, Alamy (lancement)





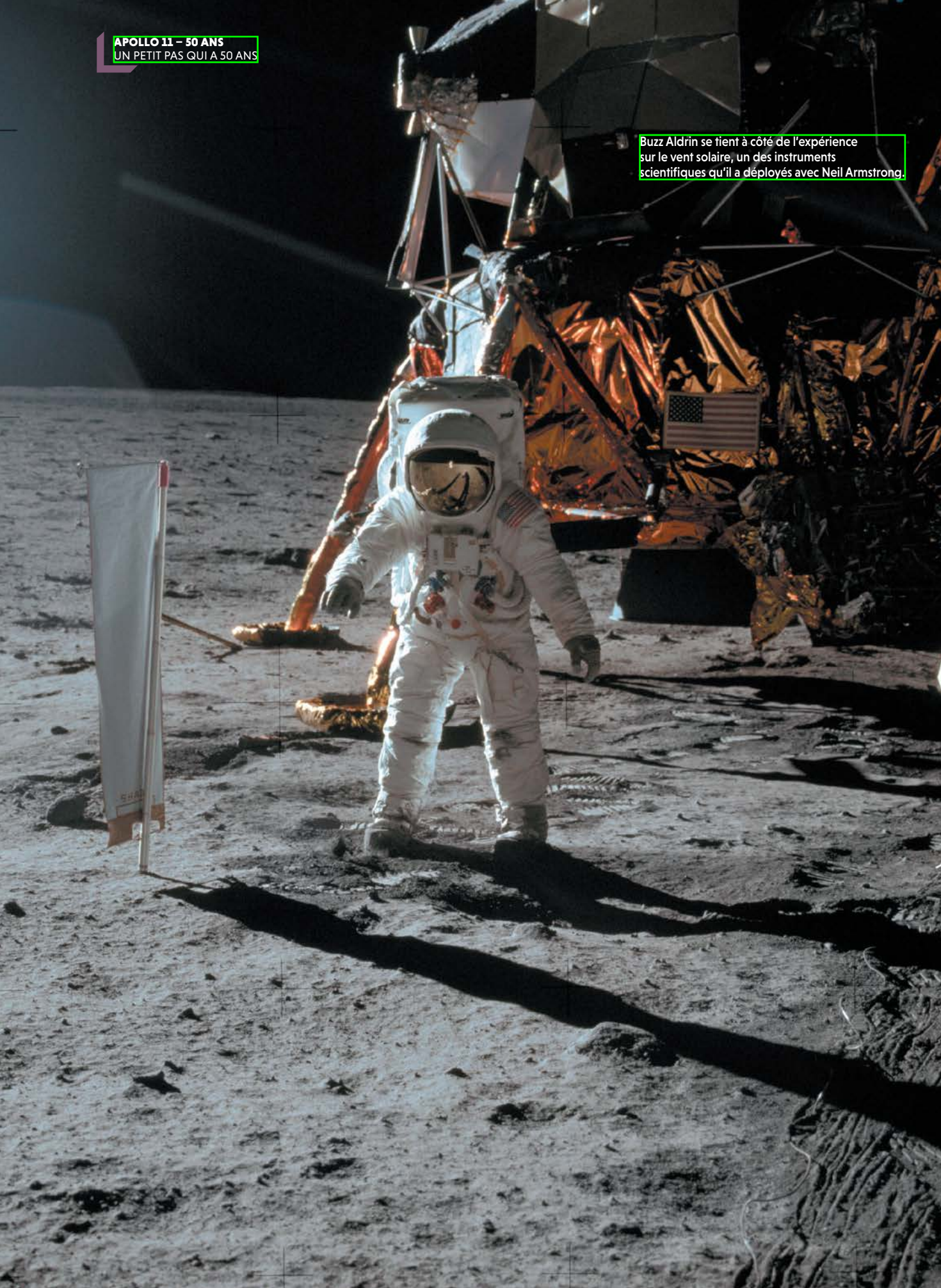
La mission *Apollo 11* décolle à bord d'une fusée *Saturn V* depuis la base de Cap Canaveral, en Floride, le 16 juillet 1969.

Le monde entier a été témoin de ce formidable exploit et de nombreuses personnes ont pensé qu'il ne faudrait pas grand-chose pour coloniser la Lune, voire prendre des vacances sur Mars. Pourtant, aucun humain n'a remis les pieds sur la Lune depuis les astronautes de la dernière mission *Apollo* en 1972. Et les plans pour envoyer des gens sur Mars, ou n'importe où dans le Système solaire, ne sont pas plus avancés aujourd'hui qu'ils ne l'étaient à l'époque.

Cette situation serait-elle en train de changer? L'administration du président américain Donald Trump semble déterminée à poser des astronautes sur la Lune d'ici à 2024. En outre, si à l'époque les États-Unis et l'Union soviétique étaient les seuls à pouvoir atteindre la Lune, depuis, d'autres acteurs sont entrés dans cette course: des pays comme la Chine, le Japon et l'Europe... et des sociétés privées.

Mais pourquoi retourner sur la Lune? Différentes raisons motivent une multitude de projets: des volontés politiques visant à la fois à redonner une sorte d'objectif commun, à créer une union sacrée en temps de crise, et à affirmer une puissance toujours intacte ou nouvelle; des enjeux économiques pour exploiter les ressources du sous-sol lunaire et développer le tourisme; sans oublier l'intérêt scientifique. Les missions *Apollo* ont rapporté plusieurs kilogrammes d'échantillons du sol lunaire. Meticuleusement analysés, ils ont fourni des informations précieuses pour comprendre comment est née la Lune. Mais pour en savoir plus, quoi de mieux que d'y retourner? ■

Buzz Aldrin se tient à côté de l'expérience sur le vent solaire, un des instruments scientifiques qu'il a déployés avec Neil Armstrong.



© Nasa / Aldrin à gauche / Aldrin sur l'échelle / Armstrong / module en orbite / Getty Images / Mario de Biasi / (pour la photo) / Getty Images / Aldrin à droite



Les journalistes suivent le décollage d'Apollo 11 depuis le centre spatial Kennedy.

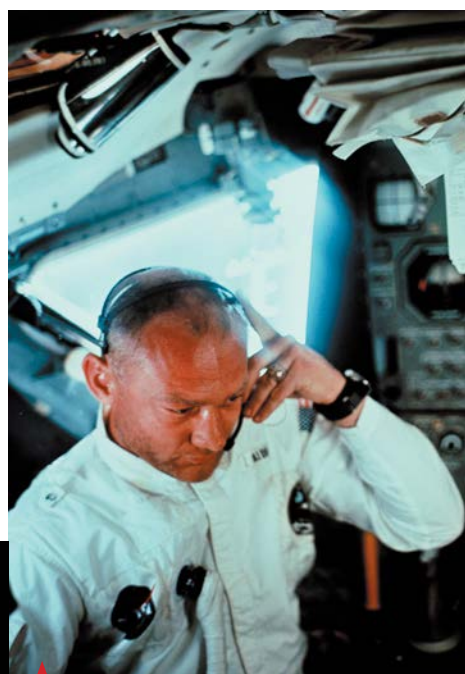
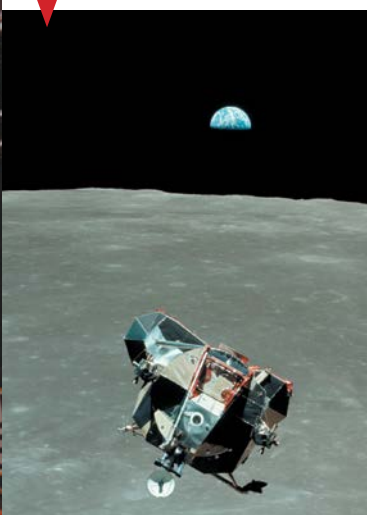


A peine de retour à bord du module après leur sortie sur la Lune, Buzz Aldrin prend ce portrait de Neil Armstrong.

Buzz Aldrin descend du module lunaire Eagle pour mettre le pied sur la Lune.

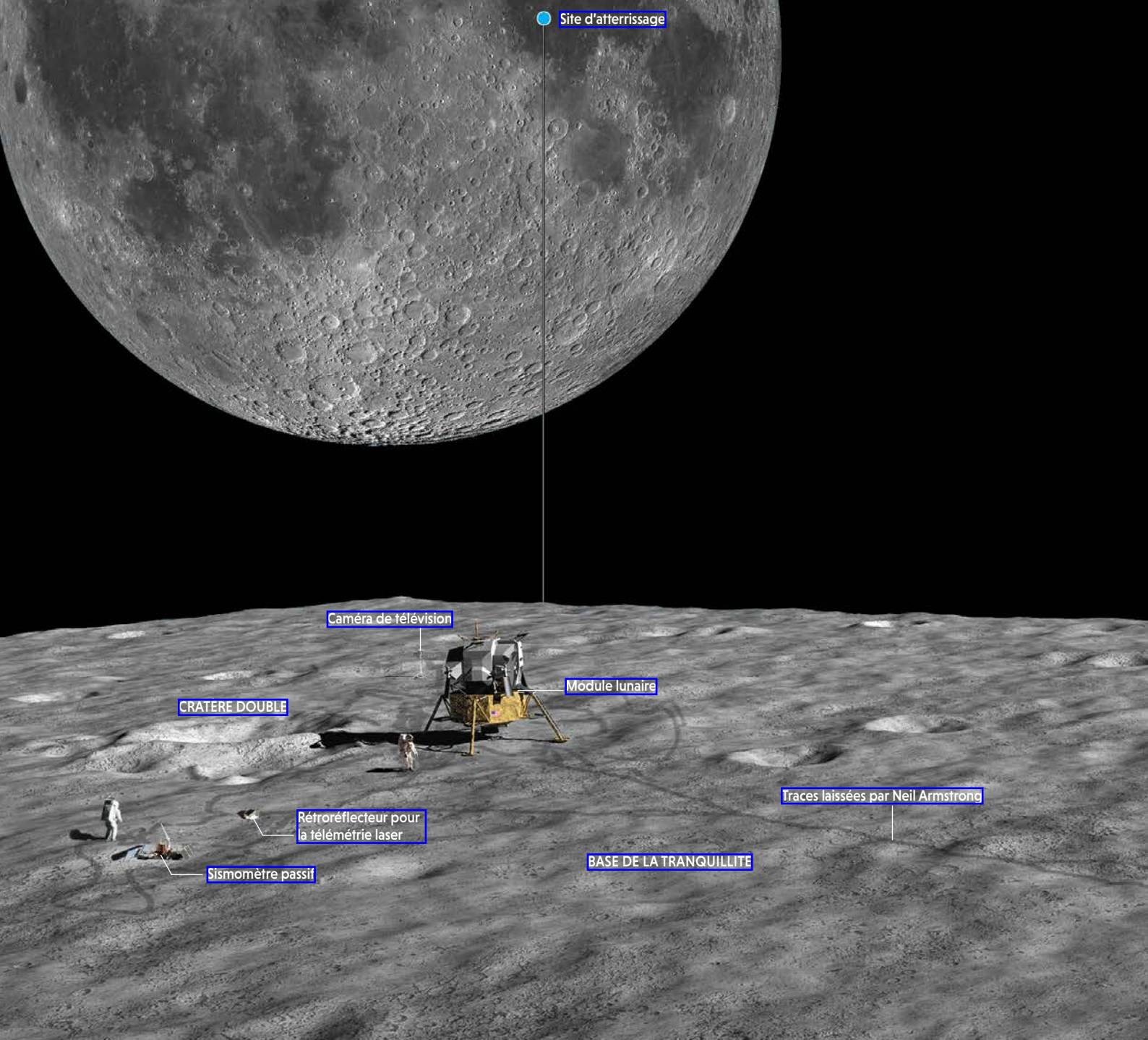


En arrière-plan, la Terre semble suspendue au-dessus de la Lune alors que le module lunaire entame sa remontée vers l'appareil resté en orbite.



Sur le module lunaire, Aldrin maintient le contact radio avec la Terre.

Sur les traces d'Apollo 11



L'AUTEUR



EDWARD BELL
directeur artistique à *Scientific American*
et auteur d'un livre iPad sur les exoplanètes

Les images satellites et des modélisations 3D récentes donnent un nouvel aperçu de la mission *Apollo 11*.

En 1969, les gens sur Terre ont suivi en direct l'aventure historique de la mission *Apollo 11* grâce à des images vidéo de mauvaise qualité, mais qui n'en étaient pas moins enthousiasmantes. Ils n'avaient cependant aucune idée de l'endroit où l'action se déroulait précisément sur la Lune et à quel point les astronautes s'étaient promenés à la surface du satellite, dans la mer de la Tranquillité. Aujourd'hui, grâce à des modèles numériques en 3D créés à partir des relevés de sondes en orbite, nous pouvons suivre pas à pas la mission et avoir une meilleure vision du terrain exploré. Cette reconstitution du site où le module lunaire s'est posé a été réalisée avec des photographies de la sonde *Lunar Reconnaissance Orbiter* (LRO) datant de 2012. La carte en relief montre le paysage que Neil Armstrong et Buzz Aldrin ont exploré, la position du module lunaire et des différentes expériences, et même des chemins que les astronautes ont empruntés.

Ces images satellitaires nous aident à préserver certains détails de la mission avant leur disparition. En effet, les températures extrêmes, le rayonnement solaire et le bombardement permanent de micrométéorites sur la surface lunaire érodent les empreintes de pas et finiront par désagréger les appareils laissés sur place. Petit à petit, la «base de la Tranquillité» s'efface...

CRATÈRE LITTLE WEST

LES ULTIMES MINUTES

Bien que méticuleusement planifiée, la mission a connu quelques péripéties alors que le module *Eagle* entamait sa descente. La figure ci-dessous indique la position de l'appareil en fonction de son altitude dans les derniers instants, quand Neil Armstrong a décidé de poser le module au-delà de la zone prévue – couverte de rochers potentiellement dangereux – et a improvisé pour choisir un autre site d'atterrissage.

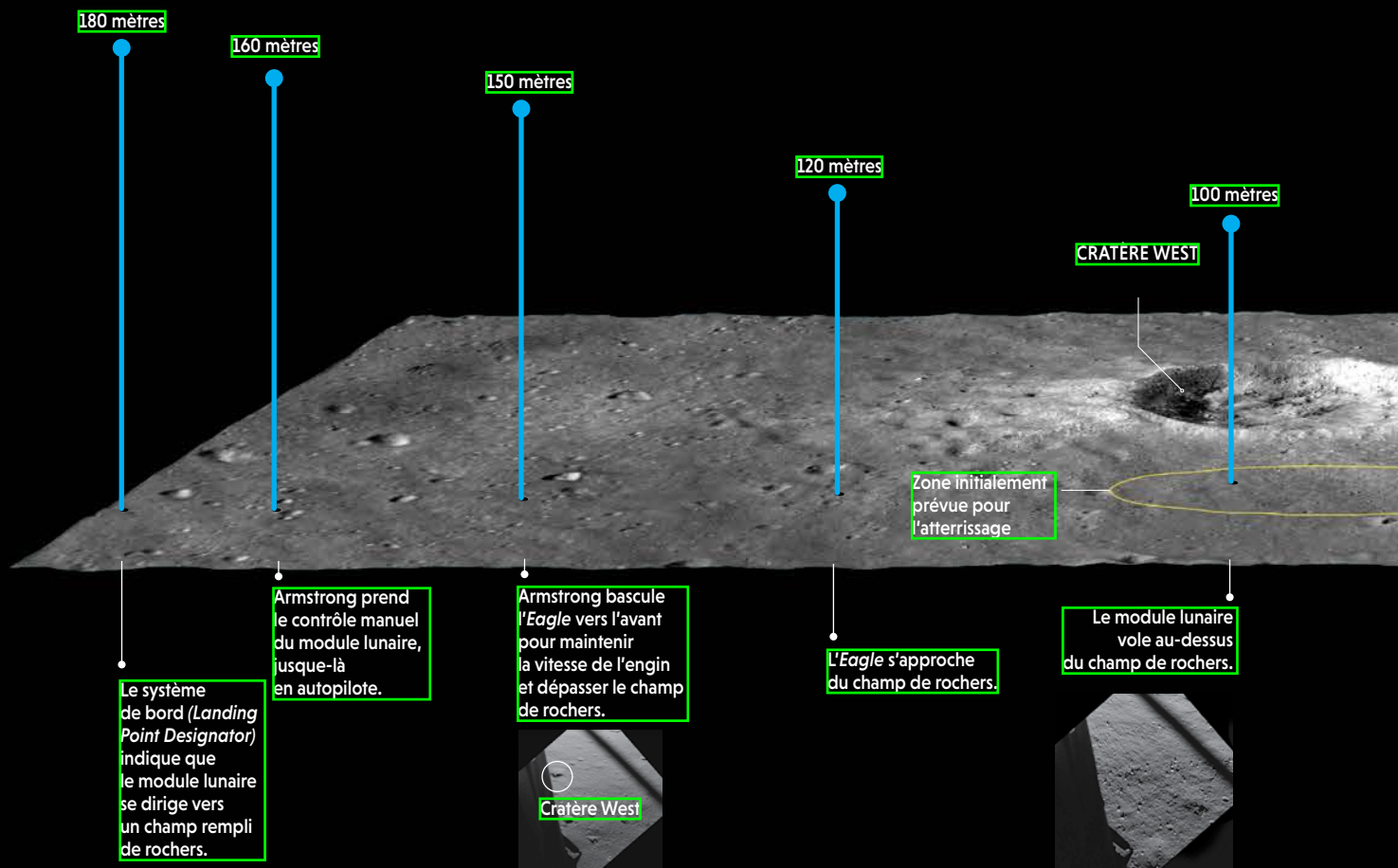
Les soucis avaient déjà commencé plus tôt. À 10000 mètres d'altitude, une alarme lumineuse étiquetée « alarme 1202 » a commencé à clignoter sur le panneau de contrôle de l'*Eagle*. « Qu'est-ce que ça veut dire ? » a demandé Neil Armstrong à son coéquipier, Buzz Aldrin, alors que la lumière clignotait et l'alarme sonnait à un rythme irrégulier. Les deux astronautes n'avaient aucun souvenir d'avoir rencontré cette alerte pendant les exercices d'entraînement. Les ingénieurs de la mission, depuis le centre de contrôle à Houston, ont fini par conclure que l'alarme pouvait être ignorée sans risque. Mais trouver son origine a fait perdre un temps précieux aux astronautes.

Alors que les réserves de carburant du module s'amenuisaient, l'*Eagle* est devenu de plus en plus difficile à manœuvrer. Quand le réservoir a été à plus de la moitié vide, le liquide

a commencé à balloter fortement. Ce mouvement a agité l'appareil dans toutes les directions. Cela a entraîné le déclenchement d'une alarme « faible niveau de carburant », 30 à 45 secondes plus tôt que prévu, donnant aux astronautes l'impression qu'ils avaient moins de temps pour rejoindre sans risque le sol que ce qui était estimé.

À 600 mètres d'altitude, Armstrong a regardé par le hublot pour examiner le site d'atterrissage initialement choisi. (Il aurait dû le faire plus tôt, mais, comme il l'a expliqué lors d'une réunion après son retour, « notre attention avait été mobilisée afin de traiter les alarmes, maintenir la machine en vol et nous assurer que nous contrôlions assez la situation pour ne pas annuler la mission. Nous étions donc concentrés sur ce qui se passait à l'intérieur du module. ») Il a trouvé le site peu propice pour poser le module en toute sécurité. Comme il l'a décrit plus tard, le site d'atterrissage était « un large cratère entouré d'une vaste zone remplie de gros rochers. »

Presque à court de temps et de carburant, Armstrong a pris le contrôle manuel du vaisseau à 160 mètres d'altitude. Au dernier moment, il a guidé l'*Eagle* au-delà du champ de rochers pour le poser sur un site moins accidenté. ■

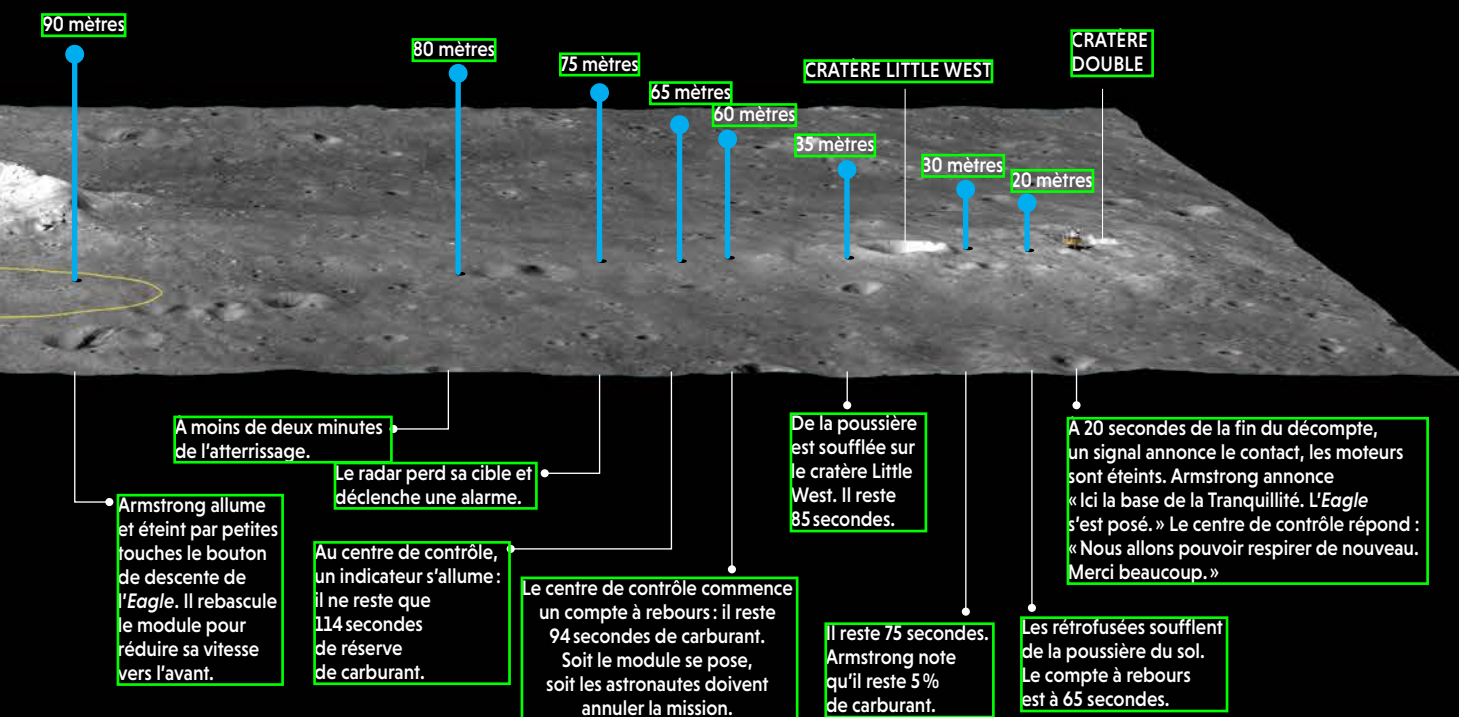
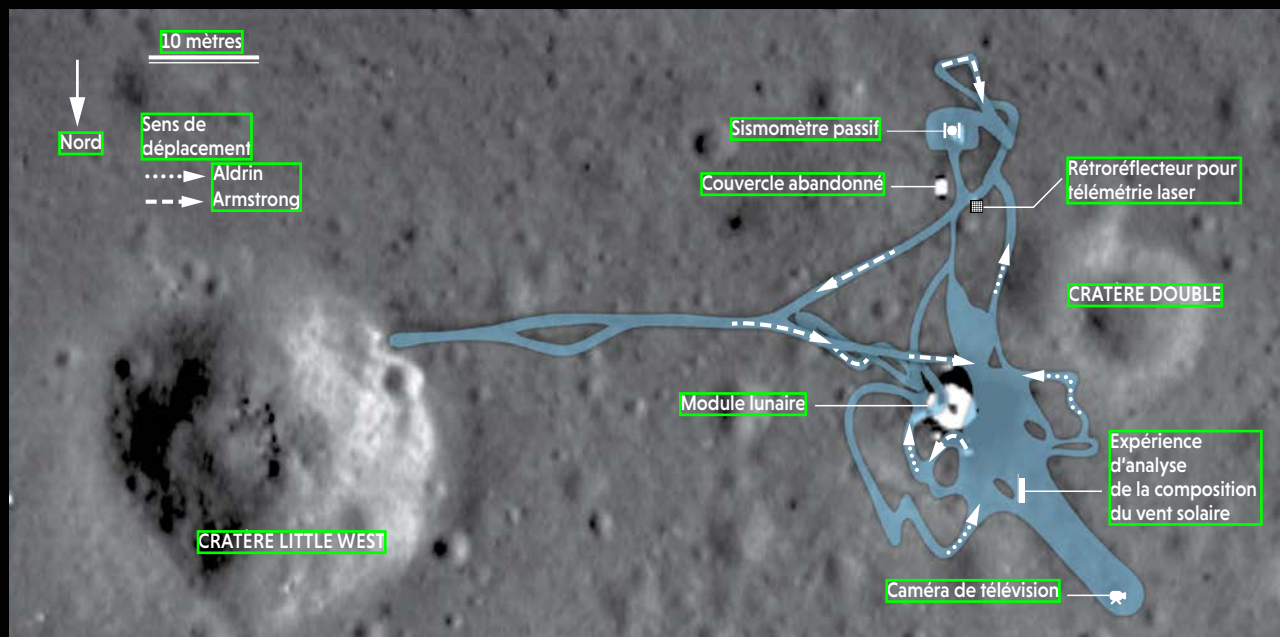


DANS LES PAS DES DEUX ASTRONAUTES

« **U**n petit pas pour l'homme » a été suivi de nombreux autres pas pour Neil Armstrong et Buzz Aldrin. Durant les 2 h 30 de leur sortie lunaire, ils ont installé de l'équipement et exploré les environs. L'image haute résolution de la caméra de la sonde LRO (ci-dessous) montre où les deux astronautes (en bleu) ont perturbé la poussière lors de leur passage sur la base de la Tranquillité. La plupart de leurs déplacements visaient à installer

des instruments scientifiques : un sismomètre passif pour détecter des séismes lunaires, un détecteur de la composition du vent solaire, dont les échantillons ont été analysés plus tard, un réflecteur laser, permettant de mesurer la distance Terre-Lune avec une grande précision et les variations dans l'orbite du satellite. C'est Armstrong qui s'est le plus éloigné de l'Eagle, lors d'une escapade non prévue vers le cratère Little West, à 60 mètres de distance.

© Nasa - Centre Goddard pour le vol spatial ; J. Schwagmeyer et B.M. Jones



© Infographie : Edward Bell (atterrissage) et Éléonore Dixon-Roche (traces de pas)

Légendes

Statut de la mission

- ⊗ Echec
- Succès
- À venir

Pays

- ▶ États-Unis
- ▶ URSS et Russie
- ▶ Chine
- ▶ Japon
- ▶ Europe
- ▶ Inde
- ▶ Israël

ATERRISSAGES RÉUSSIS

NOM DE LA MISSION

Date de lancement (UTC)

La proximité de la Lune est trompeuse : cette destination est bien difficile à atteindre. À peine plus de la moitié des 122 missions ont atteint leur objectif. Jusqu'en 1990, les États-Unis et l'Union soviétique ont été les seuls pays à lancer des missions lunaires. Le Japon, d'abord, puis d'autres les ont rejoints.

Objectifs Lune

L'ESSENTIEL

> Durant la décennie à venir, de nombreux pays et sociétés privées projettent d'envoyer des missions sur la Lune.

> Les lois internationales précisent que personne ne peut revendiquer des titres de propriété dans l'espace, pas même sur la surface lunaire. Cependant, ces lois indiquent

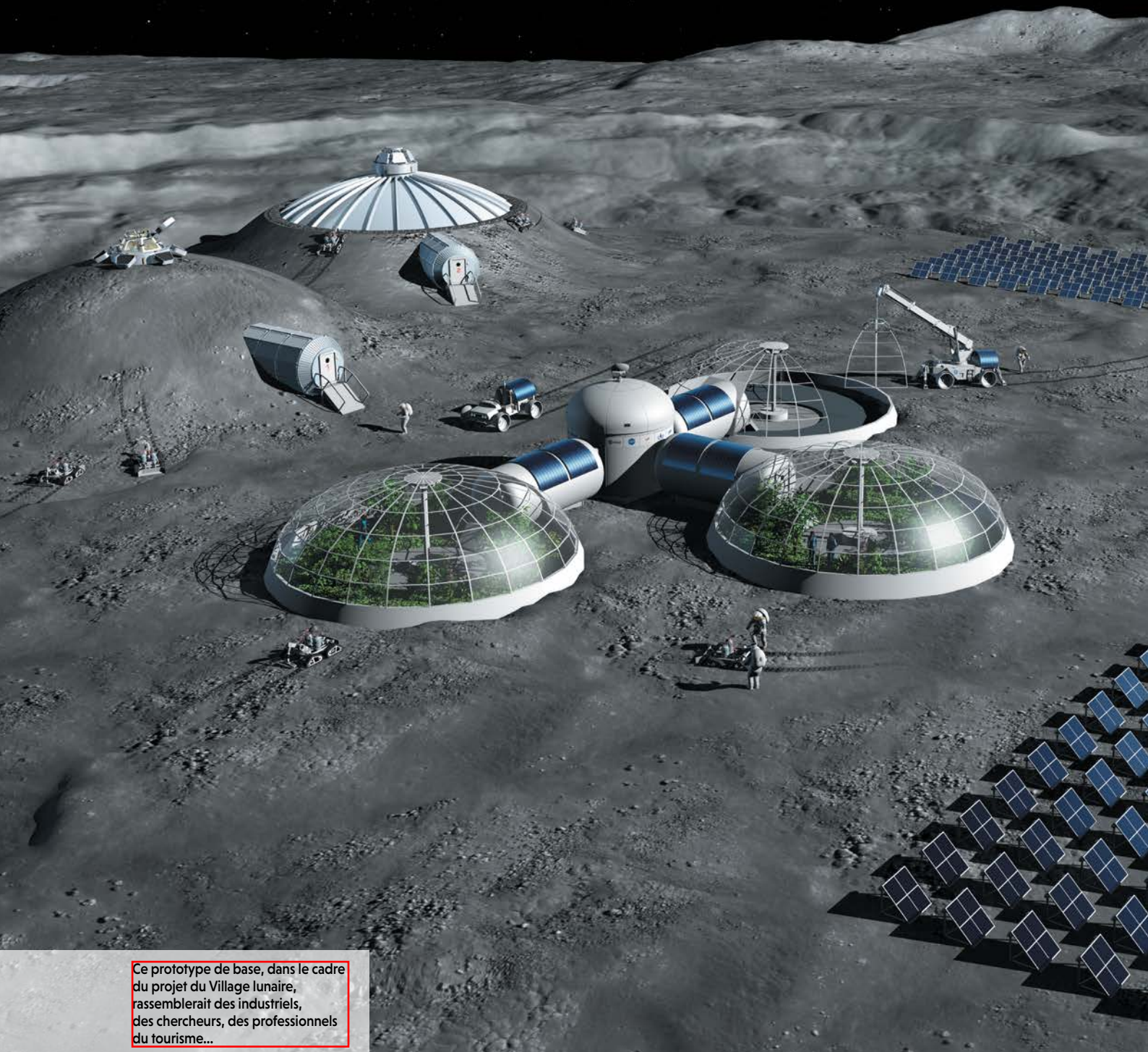
aussi qu'une fois qu'un vaisseau s'est posé à un endroit, personne ne doit atterrir sur le même site (afin d'éviter des accidents).

> Cette faille juridique pourrait motiver une ruée vers la Lune, où les premiers arrivés s'arrogeraient les sites les plus intéressants.

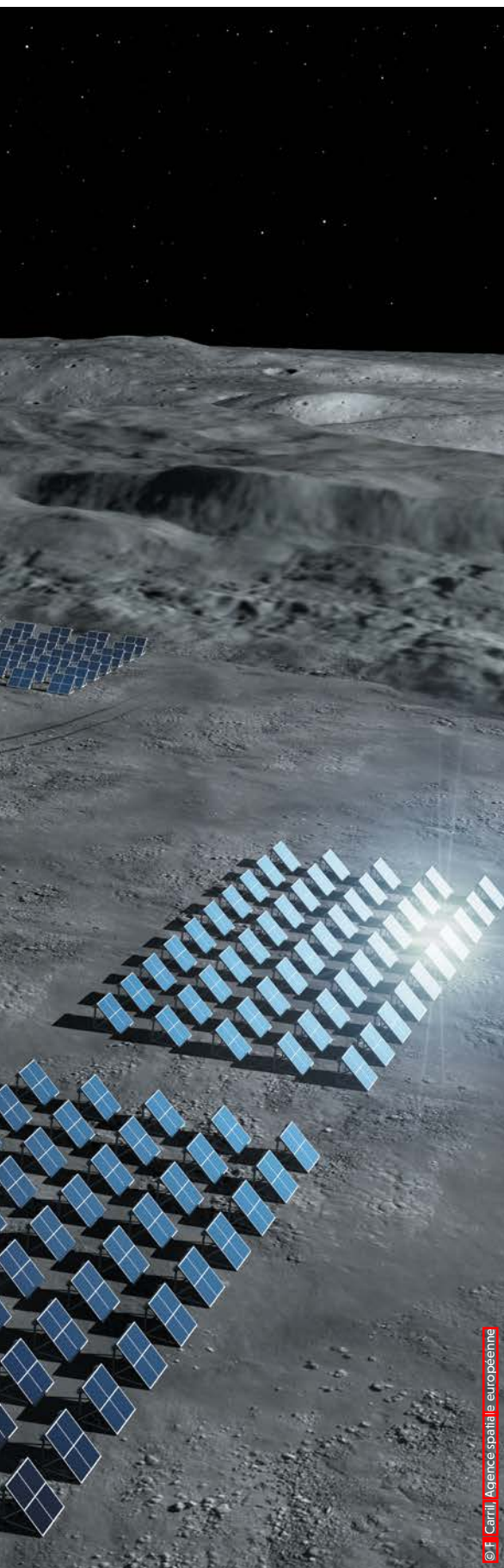
L'AUTEUR



ADAM MANN
journaliste
scientifique
spécialisé
en astronomie



Ce prototype de base, dans le cadre du projet du Village lunaire, rassemblerait des industriels, des chercheurs, des professionnels du tourisme...



© F. Carril, Agence spatiale européenne

La ruée vers la Lune

Une nouvelle course vers le satellite naturel de la Terre va commencer. Des États et des sociétés privées sont dans les starting-blocks. Objectif : s'approprier les zones stratégiques en profitant de failles dans les lois internationales.

C'est sur un écran noir et blanc aux images bruitées que s'est joué l'un des plus vieux souvenirs de Bob Richards : un module lunaire, des combinaisons spatiales, et les premiers pas historiques des astronautes Neil Armstrong et Buzz Aldrin à la surface de la Lune. Jeune enfant à l'époque, l'entrepreneur se souvient très bien qu'il était assis dans le salon familial à Toronto alors que son père s'escrimait avec l'antenne de la télé pour améliorer la qualité de l'image. « Apollo 11 a été un événement clé dans l'histoire de l'humanité, » raconte le fondateur de Moon Express, une société dont l'objectif est de développer un moyen de transport vers la Lune et éventuellement d'y installer des exploitations minières. « L'inspiration instillée par Apollo est encore très présente dans tous les projets spatiaux actuels. »

Dans les années 1960, on pensait que la conquête de l'espace n'était qu'une question de temps ; l'humanité quitterait bientôt son berceau terrestre pour explorer l'Univers. Ce rêve a pris plus de temps que prévu, mais l'heure pourrait bientôt sonner. Une poignée de nations, mais aussi des sociétés privées, ont planifié des missions pour retourner sur la Lune dans un futur proche... une situation mûre pour engendrer des conflits.

À peine deux ans avant Apollo 11, afin d'éviter de telles crises, les États-Unis, l'Union soviétique et le Royaume-Uni ont signé le traité de l'espace (il compte aujourd'hui 107 signataires). Cet >

accord stipule que l'exploration spatiale doit se faire de façon pacifique et pour le bénéfice de l'ensemble des nations. Il indique aussi que personne ne peut s'approprier un territoire sur un corps céleste. Mais dans les dernières parties du traité se cache une faille: deux «clauses de non-interférence» qui demandent aux signataires de ne pas détruire ni endommager les véhicules ou bases d'autrui, par exemple en atterrissant sur une structure déjà présente. Si cette remarque semble raisonnable, elle crée une faille qu'un pays ou une entreprise peut exploiter pour s'approprier un terrain simplement en y arrivant le premier.

Dès lors, si des nations ou des organismes s'engouffrent dans cette faille, «cela déclencherait un partage de la Lune similaire au partage de l'Afrique qui a débuté dans les années 1880, quand on a découvert des ressources minières au Congo», souligne Martin Elvis, du centre d'astrophysique de l'université Harvard et de l'institut Smithsonian.

Plusieurs missions sont d'ores et déjà programmées pour les années à venir. Elles visent toutes la même région: les pôles. La mission indienne *Chandrayaan-2* devrait décoller en juillet. L'agence spatiale chinoise a annoncé que ses trois prochaines sondes auront le même objectif. Roscosmos, l'agence spatiale russe, développe le programme *Luna-Glob*, qui se posera non loin du cratère Boguslawsky près du pôle sud d'ici à 2021. La même année, le Japon espère lancer Slim, un module d'exploration de la Lune, qui sera capable de se poser avec une précision extrême. La Nasa, l'Agence spatiale européenne et les entrepreneurs privés ne sont pas en reste. En mai, Jeff Bezos, le PDG d'Amazon et fondateur de la société de vol spatial Blue Origin, a révélé les plans de *Blue Moon*, un module lunaire qui, selon ses dires, sera en mesure de transporter un équipage humain dans les cinq prochaines années (voir la photo ci-contre).

La société Moon Express de Bob Richards vise aussi le pôle sud pour 2021. «Notre motivation est d'arriver avant les autres et nous avons l'intention de nous assurer que nos droits de non-interférence seront bien respectés», explique l'entrepreneur.

LE PÉTROLE DE L'ESPACE

La superficie de la Lune est vaste (comparable à celle de l'Afrique), mais les ressources intéressantes n'y sont pas réparties de façon égale et uniforme. Le fer et le titane, utiles pour construire des bâtiments sur la Lune et certains dispositifs techniques, sont abondants dans certaines régions de la surface du satellite (voir la figure page 56). Les réserves d'hélium 3, présentes dans la couche supérieure du sol lunaire (dans le régolithe) de certaines zones, seraient susceptibles d'alimenter des réacteurs à fusion des bases, de même que le thorium servira de



combustible pour les réacteurs à fission (voir la figure page 57). Mais les «ressources» ne se limitent pas aux matériaux extractibles. Certains reliefs, comme les cratères d'impact, sont des sites stratégiques qui protégeront les astronautes des radiations. La face cachée de la Lune sera aussi intéressante pour y installer des télescopes, car la masse de la Lune fera écran contre les bruits parasites liés à l'activité humaine sur Terre, notamment les émissions radios.

À court terme, la ressource la plus importante sera l'eau. Les astronautes la consommeront ou utiliseront ses constituants afin d'alimenter des piles à combustibles. Pour ces premiers explorateurs extraterrestres, l'eau sera en quelque sorte le pétrole de l'espace.

En mai 2019, la société Blue Origin de Jeff Bezos (le président d'Amazon) a dévoilé son projet de module lunaire *Blue Moon*. Il pourra livrer 3,6 tonnes de matériel sur la surface de la Lune. Et des versions améliorées seront habitées. Une première mission est prévue d'ici à 2024.

Une course à la Lune conduirait à son partage entre les grandes puissances comme celui de l'Afrique dans les années 1880

LE VILLAGE LUNAIRE: UN PROJET COMMUN

Sans la Guerre froide, la mission *Apollo 11* n'aurait probablement jamais vu le jour. Il était urgent de battre les Soviétiques dans la course à la Lune et d'établir la supériorité de la technologie américaine. En 1966, au plus fort de cette course, le congrès américain avait ainsi alloué près de 4,5 % du budget national à la Nasa, l'agence spatiale américaine. Mais à peine trois ans après la mission qui a permis à Neil Armstrong et Buzz Aldrin de poser le pied sur la Lune, la Nasa ne recevait pas plus de 2 % du budget global. Cette part est d'environ 0,5 % depuis 2010.

De nos jours, le prestige national n'est pas un argument assez fort pour convaincre de nombreux pays à se lancer seuls vers l'espace. Si nous voulons voyager de nouveau vers un corps planétaire, la Lune ou Mars, par exemple, il faudra le faire ensemble. Un des plus fervents avocats de cette idée est Johann-Dietrich (« Jan ») Wörner, directeur général de l'agence spatiale européenne (ESA). En 2015, il a déclaré vouloir construire une base habitée ou robotisée permanente sur le satellite naturel, nommée le « Village lunaire », à l'aide d'une coopération internationale. Les États, les sociétés privées, les universités, les associations à but non lucratif et les individus sont invités à y envoyer des personnes et des robots, et à y organiser tout type de projet scientifique, commercial ou exploratoire.

« Le village lunaire est

un concept ouvert et multipartite, explique Jan Wörner, et chaque mot dans cette définition a son importance. » L'idée serait d'accueillir autant de membres que possible et il n'y a pas de critères spécifiques à remplir pour y participer. Jan Wörner privilégie le terme de « concept » car il n'y a pas un objectif unique. Différents membres contribueraient comme ils le veulent selon leur intérêt, que cela concerne le transport, l'exploitation minière, le tourisme, la science, le développement de nouvelles technologies, etc.

Afin de promouvoir ce concept et d'en garantir les principes, une organisation non gouvernementale installée à Vienne, en Autriche, et nommée l'Association du village lunaire, a été créée en 2017. Elle répond à certains critères de neutralité politique, d'ouverture à toutes les nations et individus, de coopération, etc.

A la suite de l'annonce du directeur général de l'ESA, de nombreux pays ont répondu avec intérêt à cette proposition, comme la Chine, les États-Unis, le Japon et la Russie. Jan Wörner est convaincu que ces nations sont aujourd'hui prêtes à collaborer pour exploiter la Lune.

Le Village lunaire n'en est

encore qu'à un stade très préliminaire. Et survivra-t-il aux intérêts des uns et des autres ? Malgré son optimisme, Jan Wörner espère que l'aventure lunaire ne ressemblera pas à la conquête de l'Ouest des États-Unis au XIX^e siècle. Et que la Lune ne sera pas couverte de murs et de barrières d'ici à quelques années.

CLARA MOSKOWITZ
Scientific American

Les « pics de lumière éternelle » aux pôles lunaires sont probablement les sites les plus prometteurs pour y exploiter de l'eau. Ces reliefs se sont formés sur les bords de cratères dus à des astéroïdes dont l'impact a rejeté de grandes quantités de matière en périphérie de l'impact. La Lune évolue sur une orbite telle que le Soleil éclaire presque toujours ces pics. C'est donc un endroit stratégique pour installer des panneaux solaires. Les astronautes pourraient y installer leurs bases et extraire l'eau qui s'est accumulée sous forme de glace au fond des cratères, à l'inverse plongés dans une obscurité permanente.

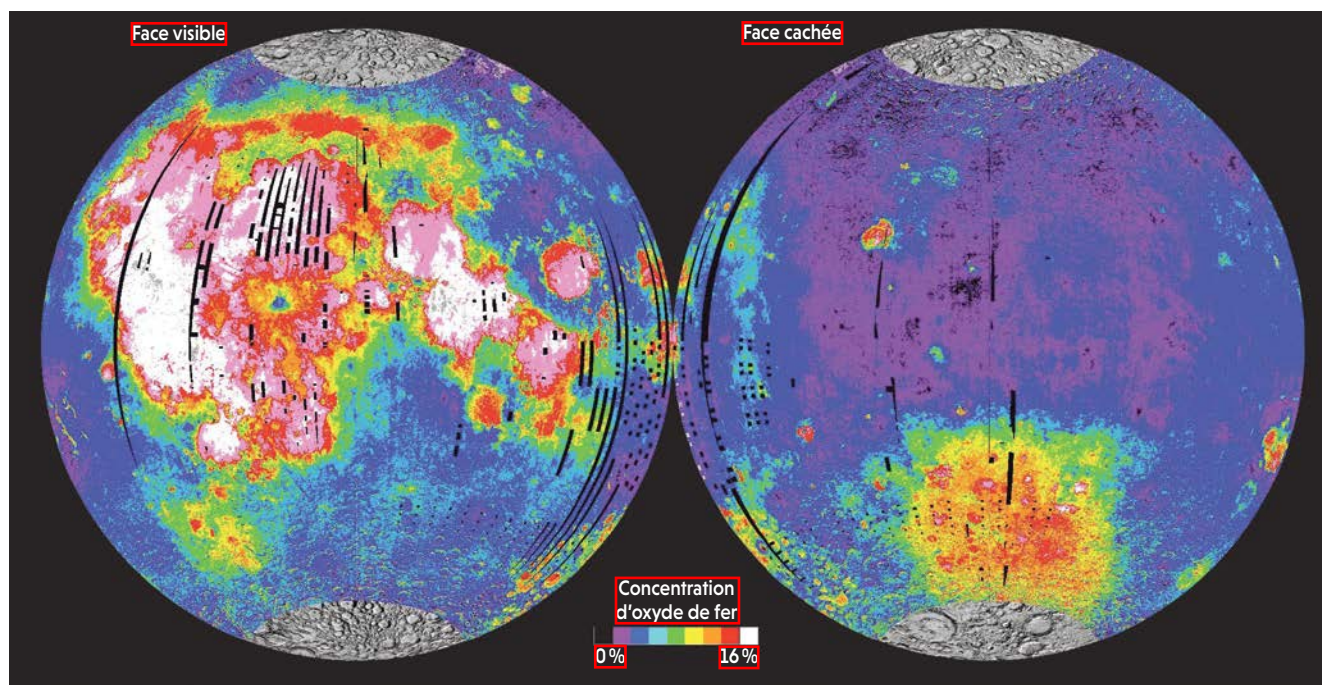
Chaque pôle présente quelques pics de lumière éternelle de quelques centaines de mètres de diamètre. Du fait de leur rareté, on comprend comment le principe de non-interférence sera instrumentalisé sur ces sites. « Ces cratères sont si petits que personne ne pourra s'y poser sans risquer d'endommager un vaisseau qui s'y trouve déjà », explique Ian Crawford, planétologue à Birkbeck College, à Londres, et spécialiste des ressources lunaires. « La première société ou le premier État qui se posera sur l'un de ces pics en sera *de facto* le propriétaire, peu importent les subtilités juridiques. »

FAILLES JURIDIQUES

Quand le traité de l'espace a été écrit, seuls deux pays, les États-Unis et l'Union soviétique, pouvaient prétendre pouvoir atteindre la Lune. Depuis sa signature, les juristes discutent des implications du traité. Et les développements récents, comme la montée du voyage spatial commercial, ont soulevé de nouvelles questions que personne n'avait imaginées à l'époque.

En 2015, le congrès américain a provoqué un tollé international en adoptant le *Space act*. Celui-ci confirme que personne ne peut s'arroger la propriété d'une région d'un corps céleste, mais que tout matériau extrait d'un tel corps appartient à celui qui a réalisé le forage, ce qui ouvre la possibilité de le vendre. En mars 2017, lors de la réunion du comité des Nations unies pour l'utilisation pacifique de l'espace extra-atmosphérique, les représentants de la Russie, du Brésil et de bien d'autres pays ont fermement protesté contre cette loi américaine. Ils ont affirmé que l'exploitation minière extraterrestre était une façon de s'approprier des territoires *de facto* et qu'un consortium global était nécessaire pour réguler les opérations de forage.

D'autres pays ont pris le parti des États-Unis et de leur vision non interventionniste de la loi, comme le Luxembourg qui voudrait être un acteur important dans l'exploitation des ressources spatiales. La Chine a opté pour un positionnement intermédiaire, dans l'attente de voir quelle interprétation des lois prendra l'avantage. « Les lois internationales sont décidées par les pays de façon collective », explique Frans von der Dunk, professeur de droit spécialiste de



l'espace à l'université du Nebraska-Lincoln. «Mais si un pays considère qu'une décision est légale alors que pour un autre, elle nécessite une tutelle internationale, on se retrouve face à un gros problème.»

Pour l'heure, la situation semble être à l'avantage du principe du premier arrivé, premier servi. Et les grands gagnants seront les pays riches et les entreprises qui atteindront les zones les plus intéressantes de la Lune d'ici peu. Cela suscitera des tensions entre ces pays et avec ceux moins puissants qui n'auront pas pu revendiquer leur part de la Lune. «C'est un peu ce que l'on observe actuellement dans la mer de Chine», indique Ian Crawford. Il n'y a pas non plus de moyen de garantir que les régions d'intérêt scientifique seront préservées. Pour Tony Mulligan, spécialiste d'éthique au King's College, à Londres, ces questions doivent être sérieusement discutées avant que les premières activités d'exploitation minière ne commencent : «Une fois qu'il y aura une présence permanente sur la Lune, les lois prendront une autre dimension, et les failles, si énormes qu'un vaisseau spatial pourrait les traverser, ne pourront plus être ignorées.»

Pour beaucoup d'experts, le programme spatial chinois, grâce à une forte volonté politique et des capacités techniques, a une bonne longueur d'avance dans la course à la Lune. Les ingénieurs chinois affirment qu'ils sont en mesure de poser un module lunaire avec une précision de l'ordre du centimètre. Leurs futures missions *Chang'e* auront pour objectif de rapporter des échantillons de roche lunaire et de réaliser une prospection minutieuse des pôles. «Il serait probablement dans le meilleur

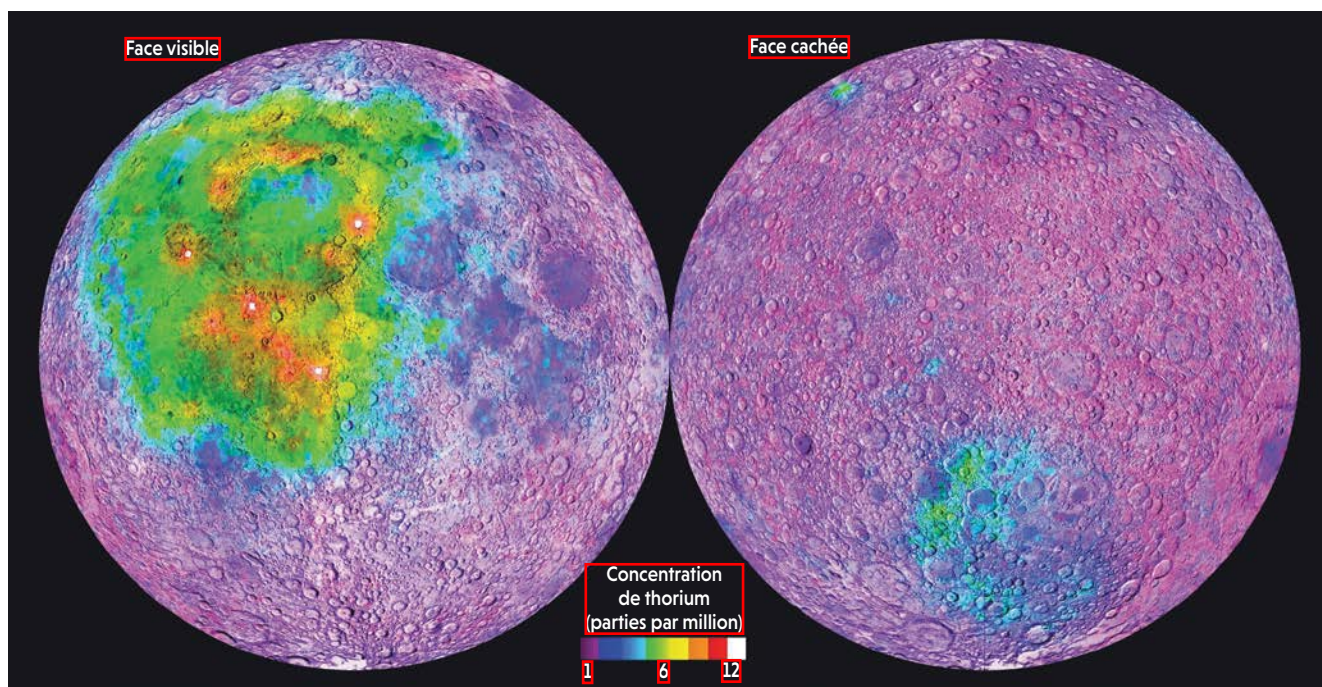
intérêt des autres pays de réfléchir à un ensemble de règles pour encadrer la concurrence, même si cela implique de perdre un peu d'autonomie et de liberté d'action», avance Frans von der Dunk.

Des groupes de réflexion ont commencé à se pencher sur la question. Il y a quelques années, Tanja Masson-Zwaan, experte en lois spatiales à l'université de Leyde, aux Pays-Bas, a fondé, avec d'autres, le Groupe de travail international de La Haye sur la gouvernance des ressources spatiales, une organisation qui rassemble des gouvernements, des industriels, des chercheurs, etc., afin d'établir des recommandations sur les activités minières extraterrestres. En 2017, le groupe a esquissé les bases d'un cadre juridique pour des principes visant à protéger au mieux les intérêts de tous les acteurs dans le cadre des lois internationales. Tanja Masson-Zwaan et ses collègues recommandent d'établir un organisme sur le modèle de l'Union internationale des télécommunications, une agence des Nations unies qui assigne les orbites des satellites envoyés dans l'espace et attribue les bandes du spectre électromagnétiques pour les télécommunications.

RISQUES ET RÉCOMPENSES

Même si les plans sont en place pour s'emparer des zones stratégiques sur la Lune, l'extraction de ressources comme les terres rares et leur expédition sur Terre sont un objectif à long terme. Et d'ailleurs, certains n'y croient pas du tout. Au regard du coût exorbitant et des obstacles techniques pour seulement aller dans l'espace, sans parler de poser un module sur la surface lunaire, il est difficile de croire

Les analyses spectrométriques du sol lunaire montrent la répartition du fer sur la face visible (à gauche) et la face cachée (à droite). On note une forte concentration sur la face visible, ainsi que près du bassin Pôle Sud-Aitken sur la face cachée. Les zones les plus riches seront les cibles principales pour des exploitations minières. Sur la page ci-contre, la carte de répartition du thorium, qui pourrait alimenter des réacteurs nucléaires.



que rapporter des matériaux lunaires sur Terre sera rentable de sitôt. Deux sociétés privées, Deep Space Industries et Planetary Resources, fondées au début du xxi^e siècle pour l'exploitation minière d'astéroïdes, ont échoué à attirer des investisseurs. L'idée d'aller chercher des ressources dans l'espace ne séduit pas encore. Les deux entités ont depuis été rachetées, l'une par un fabricant de satellite, l'autre par une société spécialisée dans la cryptomonnaie. « Cette situation est très différente de la ruée vers l'or aux États-Unis, quand n'importe qui possédant une mule et une pioche pouvait tenter le coup », explique George Sowers, un expert des ressources spatiales à l'école des mines du Colorado.

Néanmoins, si des activités économiques se développent dans l'espace, les exploitations minières suivront, selon les experts. Martin Elvis souligne, par exemple, que les sociétés privées de lanceurs spatiaux, comme SpaceX d'Elon Musk, font baisser le coût d'envoi des véhicules dans l'espace. Plus il sera facile et bon marché de voyager dans l'espace, plus les missions se banaliseront. Et la demande associée en ressources encouragera aussi le développement de la filière, d'autant qu'il est plus aisé de faire partir des matériaux depuis la Lune, car son champ de pesanteur est six fois plus faible que celui de la Terre.

Bob Richards compte bien jouer un rôle dans cette aventure qui rapprochera la Lune de la sphère économique terrestre. Mais même lui a des difficultés à dépasser l'atmosphère de la planète. Quand il a cofondé Moon Express, en 2010, la société était l'une des 16 compagnies en lice pour le Google Lunar X Prize. Ce

concours proposait à des entreprises privées de construire un engin spatial qui se poserait sur la Lune, s'y déplacerait et renverrait des photos et des données. Sa date limite, initialement en 2012, a été repoussée jusqu'en mars 2018. Mais en janvier de cette même année, la fondation X Prize a admis qu'aucune équipe n'était en mesure de prétendre à la récompense de 30 millions de dollars.

LA NOUVELLE FRONTIÈRE

Malgré cette déception, Moon Express prévoit d'envoyer sa première sonde en orbite lunaire en 2020, avant de se poser l'année suivante. Il restera ensuite à voir si le modèle économique de l'entreprise – proposer à des agences spatiales et des sociétés privées de transporter leur matériel sur la Lune – est viable à long terme. Quand on lui demande s'il ne voit pas de conflit d'intérêts entre sa volonté de s'appropriier des territoires lunaires et le besoin de trouver une solution équitable pour tout le monde, Bob Richards devient philosophe. Les contradictions dans le traité de l'espace sont le reflet du conflit entre les deux systèmes de pensée diamétralement opposés des pays qui l'ont rédigé. Les Soviétiques communistes avaient une vision collective du monde, dans laquelle les biens devaient être répartis de façon équitable, alors que les Américains capitalistes croyaient avant tout à la liberté individuelle et à celle du secteur privé. « Ce clivage explique pourquoi le traité est ouvert à différentes interprétations, explique-t-il. Je pense que les humains ont ici une chance de conquérir de nouvelles frontières vierges sans avoir à s'affronter les uns les autres. » ■

BIBLIOGRAPHIE

Traité de l'espace :
http://bit.ly/PLS501_Space

Association du village lunaire :
<https://moonvillageassociation.org/>

L'ESSENTIEL

> Les échantillons de roche rapportés de la Lune par les astronautes des missions Apollo ont profondément influencé la planétologie.

> Leur étude en laboratoire a livré des informations clés sur l'origine de la Lune et sur l'évolution du Système solaire.

> Cela a aidé au développement d'un modèle de la formation du système Terre-Lune et d'un modèle d'évolution du Système solaire primordial.

> Il faudrait aux scientifiques davantage d'échantillons lunaires pour aller plus loin encore.

L'AUTEURE



ERICA JAWIN
géologue postdoctorante au
Muséum américain d'histoire
naturelle, à Washington

Le précieux butin d'Apollo

Les roches rapportées par les missions Apollo ont si radicalement renouvelé notre vision du satellite de la Terre, que l'une des principales raisons de retourner sur la Lune serait de se procurer de nouveaux échantillons de roches lunaires.





© Toutes les photographies sont de Chris Gunn

Le plus gros morceau de roche lunaire qui reste de l'échantillon 15556, prélevé durant la mission *Apollo 15*, se trouve à l'intérieur d'un sac en téflon dans une armoire de stockage remplie d'azote du Centre spatial Johnson.

Les missions *Apollo* sont bien connues pour avoir introduit l'humanité sur la Lune. Cependant, leur apport scientifique le plus significatif consiste en 382 kilogrammes de pierres et de régolite, la couche de poussière et de débris créée par les incessants impacts météoritiques sur la surface lunaire. Ce que nous ont apporté ces échantillons de roche et de poussière est incomparable. Ils ont permis de jeter les bases de la planétologie moderne et ils nous ont donné un aperçu crucial sur les processus géologiques à l'œuvre sur tous les corps planétaires.

Je suis née trop tard pour assister à la mission *Apollo 11*, lors de laquelle des hommes ont foulé la Lune pour la première fois, mais les échantillons de roche rapportés des six missions incluant un alunissage ont directement influencé ma carrière de planétologue. Ainsi, pour mener des recherches sur les dépôts des explosions volcaniques à la surface lunaire, j'ai exploité des données obtenues sur des échantillons prélevés directement sur la surface lunaire lors des missions *Apollo 15* et *17*. Et d'autres résultats ont été recueillis par des sondes en orbite autour de la Lune, construites et lancées grâce aux connaissances scientifiques et techniques acquises pendant le programme *Apollo*.

8 000 ÉCHANTILLONS LUNAIRES EN COURS D'ANALYSE

Du reste, Ryan Zeigler, le conservateur des échantillons *Apollo* de la Nasa, explique qu'au cours des 50 dernières années, plus de 500 chercheurs de plus de 15 pays ont demandé, à 3 190 reprises, des échantillons lunaires. Au fil des décennies, confie-t-il, l'agence a distribué plus de 50 000 échantillons lunaires; actuellement, 145 astronomes, biologistes, chimistes, physiciens du solide ou encore géologues étudient plus de 8 000 échantillons. Pour impressionnant que soient ces chiffres, les résultats qu'ils ont apportés le sont encore davantage: les roches lunaires ont bouleversé notre vision de la surface de la Lune, de son origine et de l'évolution du Système solaire.

Avant l'envoi d'engins spatiaux et d'astronautes, nos connaissances sur la Lune étaient spéculatives et limitées aux observations possibles depuis la Terre. Elles suggéraient un très grand âge de la surface lunaire, puisque, manifestement, des cratères d'impact s'y étaient accumulés pendant des milliards d'années. Une hypothèse que les géochimistes purent confirmer quand les premiers astronautes sont revenus de notre satellite: grâce aux isotopes (des versions d'atomes d'un même élément chimique différant par le nombre des neutrons) se désintégrant à diverses échelles de

temps présents dans les roches lunaires, ils prouvèrent que celles rapportées de la Lune étaient bien plus anciennes que la plupart des roches terrestres: leurs âges varient entre 3 à 4,5 milliards d'années.

Les planétologues établirent alors un lien, qui influa sur toutes les recherches ultérieures relatives à la Lune et aux autres corps planétaires: ils comparèrent les premiers âges mesurés, ceux des échantillons rapportés du site d'alunissage d'*Apollo 11*, avec le nombre de cratères d'impact des environs de l'endroit où chacun avait été recueilli. Ils utilisèrent les données ainsi produites pour modéliser l'accumulation des cratères à la surface de la Lune. Le modèle obtenu fait des sites d'échantillonnage d'*Apollo* une sorte de pierre de Rosette de la planétologie, qui fournit une méthode d'estimation de l'âge de n'importe quel endroit de la Lune, voire d'autres corps planétaires.

Vieux d'environ 4,5 milliards d'années, le plus ancien échantillon a essentiellement le même âge que la Lune elle-même. La plupart des roches terrestres ont en revanche bien moins de 4 milliards d'années, car sur Terre la tectonique des plaques recycle en permanence la croûte de notre planète. Ce n'est pas le cas sur la Lune, de sorte que les roches lunaires nous renseignent sur les roches des débuts du Système solaire. Il se pourrait même qu'elles nous renseignent sur la Terre jeune.

En mars dernier, des chercheurs ont ainsi publié l'analyse d'une brèche rapportée par *Apollo 14*, c'est-à-dire de l'un de ces conglomerats de débris divers de roche soudés entre eux par quelque liant. Ils avancent que l'un des composants de cette brèche pourrait être d'origine terrestre: il s'agirait d'une roche éjectée de la Terre il y a quelque 4 milliards d'années. Cette météorite d'origine terrestre serait tombée sur la Lune où, plusieurs milliards d'années plus tard, l'astronaute Alan Shepard l'a ramassée et ramenée sur Terre.

Avant les missions *Apollo*, les chercheurs spéculaient sur la formation de la Lune et



Selon la théorie actuelle, la Lune s'est formée à la suite d'une collision géante avec la Terre



Ces quatre échantillons ont été prélevés lors des missions *Apollo 15* (près du Mont Hadley dans les Monts Apennins au sud-ouest de la mer des Pluies), *Apollo 16* (sur un haut plateau lunaire région du cratère Descartes) et *Apollo 17* (dans la vallée Taurus-Littrow, dans une région de hauts plateaux lunaires). Ces trois missions ont été les dernières au cours desquelles des astronautes ont foulé le sol de la Lune.

d'autres satellites planétaires. Certains pensaient que la Terre avait capturé un corps passant à proximité; d'autres, que la jeune Terre tournait si vite qu'une sorte d'énorme « goutte de roche » s'en serait détachée; d'autres encore, que la Terre et la Lune se seraient formées simultanément et en même temps que toutes les planètes du Système solaire à partir du « disque protoplanétaire » originel. Les missions *Apollo* nous ont fait basculer vers de nouvelles conceptions.

LE MODÈLE D'IMPACT GÉANT ET SES FONDEMENTS

Aujourd'hui, la théorie de l'origine de la Lune la mieux acceptée est celle de sa formation à la suite d'un impact géant. Dans cette conception fondée sur les indices recueillis lors du programme *Apollo*, un corps de la taille de Mars, nommé Théia, aurait percuté la Terre il y a quelque 4,5 milliards d'années. Le choc l'aurait fragmenté et aurait éjecté dans l'espace une partie de la croûte et du manteau terrestre (on nomme ainsi les quelque 3600 kilomètres sous la croûte). Les matériaux éjectés se seraient ensuite agglomérés aux restes de Théia, avant de se refroidir pour former notre satellite.

Ce modèle se nourrit de plusieurs faits constatés sur les échantillons lunaires d'*Apollo* ou pendant les expériences de surface réalisées pendant les missions. Passons en revue les principaux d'entre eux.

PEU DE FER. La Lune contient étonnamment peu de fer. Les expériences de géophysique de surface menées durant les missions *Apollo* ont montré que, par rapport aux planètes

telluriques (Mars, la Terre et Vénus, soit les planètes de roches et de métaux), le noyau de la Lune ne représente qu'une petite partie de son volume: son rayon n'est que de l'ordre de 25% seulement de son rayon total (sur la Terre et Mars, de l'ordre de 50%). Ce manque relatif de fer suggère que lors du grand impact, la Terre avait déjà constitué son propre noyau de fer, de sorte qu'il n'est resté que peu de ce métal lorsque la Lune s'est formée.

FORTE SÈCHERESSE. Les échantillons lunaires rapportés par *Apollo* sont extrêmement secs et presque totalement dénués de molécules s'évaporant facilement comme l'eau, le dioxyde de carbone, l'azote ou encore l'hydrogène. Les planétologues expliquent ce fait en avançant que l'énorme quantité d'énergie et de chaleur libérée par l'impact géant aurait chassé les composés volatils des fragments de la proto-Lune.

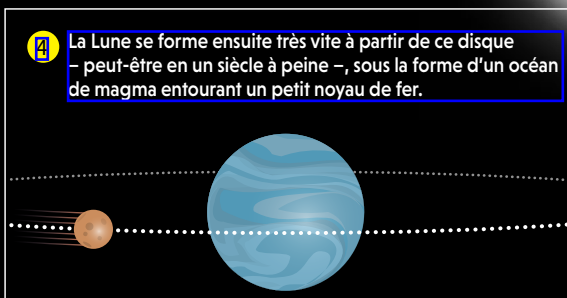
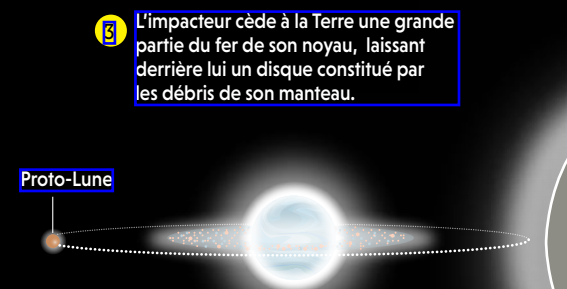
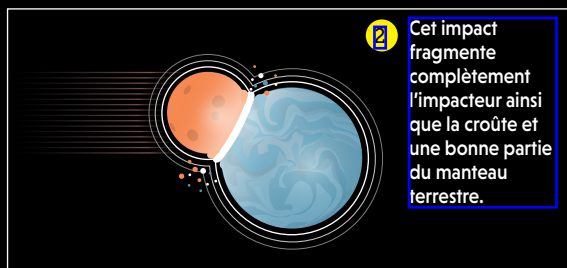
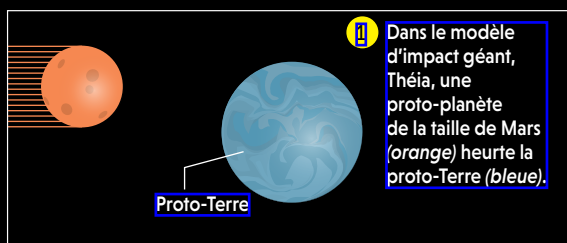
UN OCEAN DE MAGMA. L'une des idées les plus fortes provenant des échantillons lunaires est l'idée qu'il y avait un océan de magma sur la Lune à ses débuts. Des échantillons d'*Apollo 11* montrent que les hautes terres lunaires (les régions visibles de couleur claire qui se distinguent nettement des basses terres sombres constituant les « mers » lunaires) contiennent de fortes concentrations de plagioclase, c'est-à-dire du constituant majeur des roches magmatiques. La texture des roches des hautes terres suggère qu'elles se sont formées à partir d'un grand volume de roche en fusion: lors de son refroidissement, les cristaux de plagioclase, relativement légers, ont migré vers le haut par flottaison. Comme on avait trouvé en d'autres endroits des roches similaires au cours de missions robotisées antérieures et que les hautes terres lunaires sont très étendues, la couche de magma a dû couvrir la plus grande partie ou la totalité de la Lune. Dès 1970, quelque six mois seulement

DEUX MODÈLES DE FORMATION DE LA LUNE

La Lune se serait formée il y a environ 4,5 milliards d'années à la suite d'une collision entre la proto-Terre et une autre protoplanète de la taille de Mars, nommée Théia. L'impact aurait éjecté de la matière de la Terre, qui se serait mélangée avec celle de Théia afin de former la Lune. Toutefois, certaines des propriétés de la Lune, par exemple son extrême pauvreté en éléments volatils en comparaison avec la Terre, s'expliqueraient mieux en supposant la formation d'une synestia, c'est-à-dire d'un nuage annulaire transitoire de débris entourant les noyaux terrestre et lunaire, puis conduisant après un certain tri à l'accrétion de la Terre et de la Lune. Ces deux conceptions dominantes actuellement en planétologie sont détaillées ici.

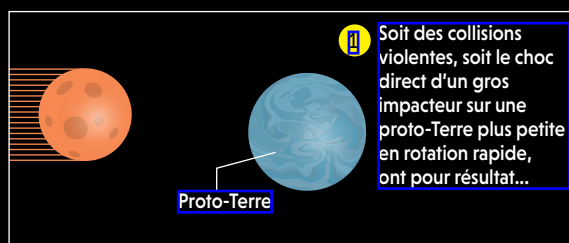
LE MODÈLE CANONIQUE : CELUI DE L'IMPACT GÉANT

Le modèle de l'impact géant rend compte de nombreuses caractéristiques de la Lune, telles l'existence passée d'un océan magmatique ou son noyau de fer de petite taille.

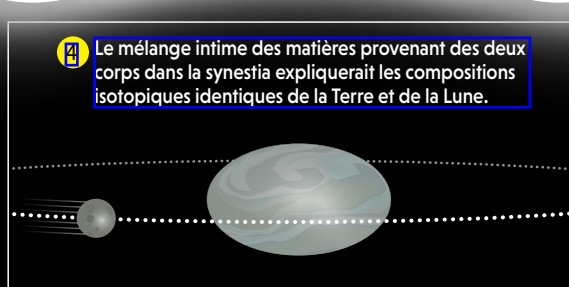
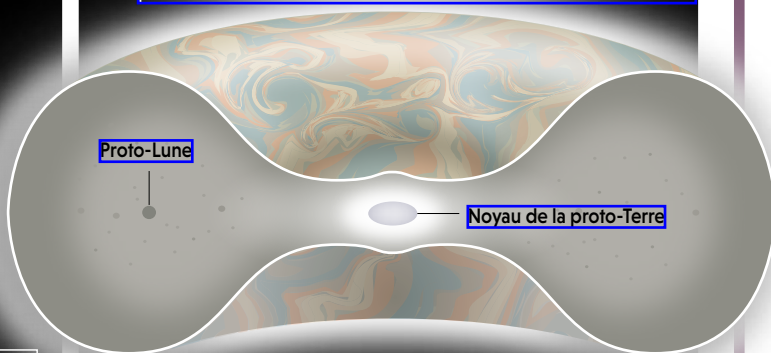


VARIANTE DU MODÈLE CANONIQUE AVEC SYNESTIA

Cette variante du modèle d'impact géant, dans laquelle la Lune se forme, puis mûrit à hautes température et pression, explique mieux certains faits, comme les compositions isotopiques identiques de la Terre et de la Lune ou la rareté des composés volatils sur notre satellite.



3 ...synestia, c'est-à-dire un nuage torique de vapeur et de fragments de roche dans lequel la Lune s'accrète et mûrit en quelques décennies. La plupart des éléments volatils restent dans la vapeur, puis tombent sur Terre au fur et à mesure du refroidissement.





Ramassé sur la Lune par les astronautes James Irwin et David Scott sur les bords du cratère Spurr, le *Genesis rock*, qui est l'échantillon 15415 ramené par la mission *Apollo 15*, est vieux d'environ 4 milliards d'années (d'où son surnom). Il a aidé à élaborer la théorie de la formation de la Lune.

après l'arrivée des premiers échantillons *Apollo*, deux groupes de chercheurs proposèrent, indépendamment l'un de l'autre, l'idée d'un océan magmatique précoce. Plusieurs autres types de données géochimiques ou géophysiques appuient par ailleurs ce modèle d'un océan de magma, qui est toujours en cours d'élaboration aujourd'hui.

L'une des découvertes met toutefois le modèle de l'impact géant au défi. À deux reprises, en 2001 et 2012, des chercheurs ont constaté, en se servant d'un procédé nommé fluoration au laser, que les concentrations isotopiques de l'oxygène et du titane dans les échantillons de roches lunaires sont presque

Des échantillons de pierres lunaires encore sous scellés attendent d'être analysés

identiques à celles des roches terrestres. Cela pose un problème: si la Lune s'est bien formée par mélange de matériaux provenant de la Terre et de Théia, comment les compositions isotopiques en titane et oxygène peuvent-elles être les mêmes dans les deux corps? Cette observation a inspiré de nouvelles propositions quant à la formation de la Lune, dont le modèle à synestia (voir l'encadré page ci-contre).

Les recherches sur les roches lunaires ramenées par *Apollo* nous ont aussi renseignés sur les autres corps planétaires. Le résultat le plus notable de ces avancées est sans doute la mise au point du « modèle de Nice » (ainsi nommé parce qu'il a été conçu à l'Observatoire de la Côte d'Azur, à Nice).

Selon ce modèle de l'évolution du Système solaire, les planètes gazeuses extérieures – Saturne, Uranus et Neptune – se seraient initialement formées plus près du Soleil et à proximité les unes des autres. Puis, quelques centaines de millions d'années plus tard, leurs trajectoires seraient devenues instables, et, sous l'influence d'une incursion de Jupiter vers le Système solaire interne, elles auraient très vite migré vers leurs orbites actuelles, à grande distance du Soleil. Ce mouvement aurait attiré vers l'intérieur du Système solaire de très nombreux matériaux de la ceinture de Kuiper, cette zone située entre 30 et 55 unités astronomiques du Soleil et peuplée de très nombreux petits corps. Ces millions de résidus des premiers moments de la formation du Système solaire seraient alors entrés en collision avec les planètes et leurs lunes, entraînant un chaos général dont témoigne la face grêlée de la Lune.

UN CURIEUX SCÉNARIO

Un tel scénario semble tiré par les cheveux, mais il explique avec élégance un certain nombre d'observations sur notre voisinage cosmique. Après avoir daté les échantillons d'*Apollo* et analysé les cratères d'impact, les chercheurs ont par exemple conclu que le nombre d'impacts a connu un pic, dû à un « Grand bombardement tardif » qui se serait produit environ 700 millions d'années après la formation des planètes. On ne savait pas expliquer ce soudain bombardement intense des planètes telluriques, mais le modèle de Nice a fourni une explication en prédisant l'attraction massive de corps de la ceinture de Kuiper vers l'intérieur du Système solaire exactement à l'époque du chaos dont témoigne la face grêlée de la Lune.

En plus de nous renseigner sur l'évolution du Système solaire, les échantillons lunaires nous ont aussi permis d'étudier l'évolution chimique des surfaces planétaires. Le processus dit de l'« érosion spatiale » explique de quelle façon les corps dépourvus d'atmosphère s'érodent. L'étude des échantillons prélevés à la surface de la Lune par les missions *Apollo* a montré qu'ils sont composés d'agglomérations de verre fondu et de fragments minéraux créés par l'impact de microscopiques poussières. Ces agglomérats, qui se forment avec le temps, peuvent constituer de 60 à 70% des échantillons de régolite mature. De minuscules perles de fer élémentaire sont aussi produites au cours de l'érosion spatiale et s'accumulent sur



On voit ici un dispositif de conservation, en cours de manipulation pour déplacer un échantillon provenant de la mission *Apollo 15* depuis son armoire de rangement sous azote vers un conteneur en acier inoxydable.

➤ les bords extérieurs de certains grains du sol, ce qui assombrit leurs surfaces avec le temps. Nous savons aujourd'hui que le rayonnement solaire, les grandes fluctuations de température et le bombardement constant par de minuscules micrométéorites contribuent tous à l'érosion spatiale.

DES ÉCHANTILLONS POUR L'AVENIR

La période actuelle de la science lunaire est passionnante: cette année, des échantillons préservés depuis leur collecte sur la Lune et faisant partie de ceux que la Nasa a intentionnellement mis de côté, dans l'attente de techniques d'analyse plus performantes que celles de l'ère *Apollo*, seront mis à disposition des chercheurs. En mars, neuf équipes de chercheurs ont ainsi été sélectionnées pour recevoir des échantillons d'*Apollo 15*, *16* et *17* non ouverts et scellés sous vide. Cette étape du programme ANGSA (*Apollo Next Generation Sample Analysis*) devrait conduire à de nouvelles connaissances sur la formation et l'évolution de notre satellite.

Si nous avons beaucoup appris des échantillons et des expériences de surface d'*Apollo*, nous avons aussi un grand besoin de nouveaux échantillons. Nous n'avons ainsi aucune roche issue de la face cachée de la Lune, de ses régions polaires ou encore de son intérieur profond. Deux types d'échantillons dont j'aimerais particulièrement disposer seraient de la glace d'un cratère polaire et des roches issues du bassin d'Aitken, sur la face cachée, qui recouvre le pôle Sud et constitue le plus grand cratère d'impact de la Lune. Son intérieur

pourrait contenir des matériaux provenant de la partie inférieure de la croûte lunaire et même de son manteau rocheux (la couche sous-jacente à la croûte). L'étude du bassin Aitken du pôle Sud nous aiderait à comprendre pourquoi de très grands bassins façonnent les surfaces et les intérieurs des corps planétaires. Disposer d'un échantillon de glace polaire lunaire nous renseignerait sur l'âge et l'origine de l'eau lunaire – ce qui pourrait aider à clarifier ceux de l'eau de la Terre.

De tels échantillons pourraient provenir tant de missions habitées que de missions robotisées: aucun consensus n'existe entre planétologues sur le caractère préférable de l'un ou l'autre type de mission. De nombreux experts soutiennent, à juste titre, que les missions robotisées sont moins coûteuses, plus sûres et peuvent durer plus longtemps que les missions humaines. Pour autant, les humains sont plus à même que les robots de prélever la plus grande variété possible de spécimens inhabituels, ce dont témoignent la diversité des origines géologiques de la composition et des âges des échantillons d'*Apollo*.

Le programme *Apollo* reste un accomplissement sans pareil. Alors que nous célébrons le 50^e anniversaire du «grand pas pour l'humanité» de Niels Armstrong, le premier astronaute sur la Lune, aucun humain n'a, depuis Harrison «Jack» Schmitt et feu Gene Cernan de la mission *Apollo 17* de décembre 1972, foulé un autre corps planétaire. En tant que chercheuse profondément inspirée par le programme *Apollo*, je travaille activement à créer un nouvel «*élan Apollo*» afin que nous puissions enfin revoir des humains explorer l'inconnu. ■

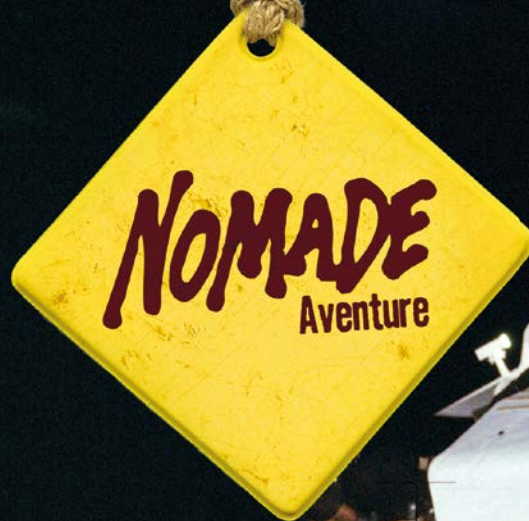
BIBLIOGRAPHIE

S. J. Lock et al., **The origin of the Moon within a terrestrial synestia**, *JGR Planets*, vol. 123(4), pp. 910-951, 2018.

M. Laneuville, **La Lune, une histoire pleine de surprises**, *Pour la Science*, n° 466, pp. 26-35, août 2016.

R. Canup, **Forming a Moon with an Earth-like composition via a giant impact**, *Science*, vol. 338, pp. 1052-1055, 2012.

M. Cuk et al., **Tidal evolution of the Moon from a high-obliquity, high-angular-momentum Earth**, *Nature*, vol. 539, pp. 402-406, 2016.



PARTEZ SUR LES TRACES DES

Explorateurs
DE L'ESPACE

Avez-vous déjà imaginé voir la véritable capsule Vostok de **Gagarine**, visiter l'émouvante maison de **Konstantin Tsiolkovski**, fondateur de l'astronautique, ou encore pénétrer dans la confidentielle **Cité des Etoiles**, base d'entraînement des cosmonautes russes ? Et tout cela, accompagné par le spationaute **Jean-Pierre Haigneré**, recordman français de durée dans l'espace (209 jours) ? Ou **revivre l'épopée de la conquête de la Lune**, et visiter le National Air and Space Museum à Washington, le Space Center de **Houston**, le Kennedy Space Center à **Cap Canaveral**, rencontrer un **astronaute américain** et peut-être même assister à un lancement ? Tout en profitant du savoir et des anecdotes de **Charles Frankel**, spécialiste de la géologie des planètes et auteur de « L'aventure Apollo - Comment ils ont décroché la Lune » (Dunod) ? **C'est désormais possible !**

☎ 01 46 33 71 71 • WWW.NOMADE-AVENTURE.COM/ESPACE

L'ESSENTIEL

> La glace de mer réfléchit une part importante du rayonnement solaire qui arrive sur la Terre et contribue ainsi à la régulation de la température de la planète.

> Les propriétés de cette glace sont mal connues. Or ces données sont nécessaires pour la modéliser de façon réaliste.

> En 2017, lors d'une expédition dans l'océan Antarctique, les chercheurs ont réalisé des prélèvements de glace (dont la forme rappelle celle des crêpes) et ont mesuré ses propriétés mécaniques.

> Ils ont ensuite développé un modèle numérique de la glace de mer.

LES AUTEURS



**FLEURIANNE
BERTRAND**
professeure
à l'université
de Berlin



TIM RICKEN
professeur
à l'université
de Stuttgart

La pêche à la crêpe de glace

Lors d'une expédition dans l'océan Antarctique, des chercheurs sont partis « pêcher » des crêpes de glace. Leur objectif : mesurer leurs propriétés pour les intégrer de façon plus réaliste dans les modèles climatiques.

Ballotté par des vagues gigantesques (jusqu'à plus de 14 mètres) et des vents soufflant à plus de 100 kilomètres par heure, le brise-glace SA Agulhas II était mis à rude épreuve. Nous avons appareillé au Cap, en Afrique du Sud, le 28 juin 2017, et nous progressions alors avec une visibilité réduite vers notre destination : l'océan Antarctique. Si cette période correspond à la saison chaude et agréable dans l'hémisphère Nord, il en est tout autrement dans l'hémisphère Sud où les saisons sont inversées. Mais pourquoi partir vers l'Antarctique à une période aussi inhospitalière ? Parce que notre but était d'étudier la glace de mer, qui ne se forme que pendant la saison la plus froide.

Malgré le confort du navire presque neuf, la vie à bord était loin d'être facile. Les brise-glace, avec leur proue arrondie, subissent bien plus fortement que les autres bateaux les chocs qui se produisent quand, après avoir été soulevés par une vague, ils retombent lourdement sur l'eau (voir la photo page 68). Ce phénomène de *slamming*, très éprouvant pour l'organisme,

donne la sensation d'être en permanence sur des montagnes russes. Ainsi, une bonne part de l'équipe (environ 50 scientifiques et 44 membres d'équipage) a souffert du mal de mer et a laissé les plus résistants assumer la surcharge de travail. Pourtant, malgré la fatigue et le mauvais temps, nous avons gardé le moral, motivés par nos projets de recherche dans le cadre de cette expédition soutenue par la fondation nationale sud-africaine pour la recherche.

L'Antarctique, l'une des régions de la Terre les plus difficiles d'accès, en particulier durant cette saison, a fait l'objet de moins de travaux de recherche que les autres parties du globe. D'où l'intérêt de cette mission qui embarque des spécialistes de diverses disciplines : des biologistes étudiant le phytoplancton, des climatologues s'intéressant au cycle de l'azote, de l'ammoniac ou du dioxyde de carbone, des ornithologues répertoriant les espèces d'oiseaux, etc. Dans notre cas, nous nous intéressons à la glace de mer et à ses propriétés.

Cette glace se forme à partir de cristaux qui se constituent dans l'eau de mer et s'agglomèrent pour former des blocs. Puis, à force de



L'océan Antarctique couvert de glace en crêpe pendant une rare accalmie. Cette glace en mer a un rôle important dans la dynamique climatique de la planète.

chocs répétés, ces larges morceaux de glace se remodelent avec des bords plus épais, et prennent une forme quasi circulaire, de 30 centimètres à 3 mètres de diamètre, d'où leur nom de *pancakes* en anglais, de *blinis* en russe ou de crêpes de glace (voir la photo page 67 et ci-contre).

Cette glace de mer contribue à la cryosphère, la partie du globe qui est recouverte par de la neige ou de la glace. Ces régions réfléchissent vers l'espace plus de 70% du rayonnement solaire qu'elles reçoivent. Ce pouvoir réfléchissant, c'est-à-dire le rapport de l'énergie réfléchie à l'énergie lumineuse incidente est nommé l'albédo. Par comparaison, l'albédo de la mer est de seulement 10%, de 10 à 25% pour la végétation, de 10 à 20% pour la roche, etc. L'albédo moyen de la Terre, toutes surfaces confondues est de 30%. En renvoyant de façon efficace le rayonnement solaire, la cryosphère contribue à réguler la température de la planète. L'albédo influe aussi sur la météo, c'est-à-dire sur les variations à court terme des conditions atmosphériques: comme il influe sur l'ensoleillement reçu, il contribue au gradient thermique qui agit sur la circulation générale de l'atmosphère.

UN RÔLE IMPORTANT DANS LE CLIMAT ET LA MÉTÉO

Pour produire des prévisions météorologiques (à court terme) ou climatique (à long terme) les plus fiables possible, les modèles numériques doivent intégrer une description la plus précise possible de la cryosphère: quelles régions sont couvertes par de la neige et de la glace et à quelle période de l'année? La réponse est complexe car elle varie d'une région à une autre et présente une forte dépendance saisonnière. En moyenne, les surfaces englacées ou enneigées représentent, entre 40 et 85 millions de kilomètres carrés, soit entre 7 et 17% de la surface de la Terre.

Certaines de ces surfaces sont étudiées depuis longtemps, c'est le cas des glaciers. À partir des années 1950, les climatologues ont commencé à s'intéresser à la banquise arctique, aux calottes polaires (du Groenland et de l'Antarctique) et aux pergélisols (des sols gelés de façon permanente). L'étude de la glace de mer a commencé plus récemment, et les propriétés mécaniques de cette vaste couche de glace, très peu étudiée *in situ*, restent encore assez méconnues. Les données sont d'autant plus lacunaires que la glace n'est que rarement permanente et a une évolution saisonnière importante: l'Antarctique perd quasiment toute sa glace de mer pendant la belle saison (l'été austral, c'est-à-dire de décembre à février), tandis que l'Arctique voit sa superficie réduite de moitié entre l'été et l'hiver.

La glace de mer se forme à partir de février en Antarctique et fond dès le mois d'octobre.

L'étude *in situ* des glaces en crêpe (à droite) dans l'océan Antarctique oblige à partir à la saison la plus mauvaise.



À l'inverse, elle se forme à partir d'octobre en Arctique. Ainsi, on estime qu'il y a toujours au moins 19 millions de kilomètres carrés d'océans couverts par de la glace de mer, avec un pic à 27 millions de kilomètres carrés en novembre chaque année.

Cependant, dans le contexte du réchauffement climatique, ces valeurs moyennes évoluent à la baisse. On observe par exemple que, depuis 2015, l'extension maximale de la glace en Arctique a été environ 10% moins importante que la valeur moyenne calculée entre 1981 et 2010, soit près de 1,2 million de kilomètres carrés (environ deux fois la superficie de la France). De la même façon, avec environ 6 millions de kilomètres carrés, l'extension minimale (en septembre, à la fin de l'été) est 25% plus faible que ce qu'elle a été. On observe des tendances similaires en Antarctique (voir la figure page 71).

Il existe cependant une différence majeure entre l'océan Arctique et l'Antarctique, qui influe sur la formation de la glace de mer. Le premier est un océan quasi fermé, entouré de terres proches, tandis que le second est ouvert. Cela implique que les courants sont plus faibles pour l'Arctique que dans l'océan austral: la glace de mer s'agglomère plus facilement et les blocs formés se fixent les uns aux autres. La modélisation de son expansion est alors simplifiée. Par ailleurs, la proximité des côtes a facilité l'étude de la glace de mer arctique, qui a débuté dans les années 1950 et qui était aussi



motivée par son impact sur l'économie (le passage des bateaux, l'accès à certaines ressources sous-marines de gisements de gaz et de pétrole). En revanche, l'étude de la glace de mer en Antarctique n'était pas une priorité, pour trois raisons principales. D'abord, sa présence n'était pas un obstacle pour les routes maritimes. Ensuite, la région est très difficile d'accès, surtout pendant la mauvaise saison, justement quand la glace se forme. Enfin, on a longtemps pensé que cette glace avait des propriétés semblables à celle de l'Arctique. En réalité, les différences sont importantes car la glace de mer en Antarctique est exposée à des vents et des courants marins bien plus forts. Ces mouvements influent le processus de

formation de la glace en mer, et donc sur certaines caractéristiques comme la densité ou la porosité et donc sur sa résistance mécanique. Ainsi, si ces crêpes sont poussés par le vent vers les côtes, elles s'y accumulent et sous la pression finissent par se briser. Ce phénomène de fracturation participe à la dynamique globale de la glace de mer. Mais, comment la résistance aux forces mécaniques varie-t-elle exactement entre la glace arctique et antarctique?

Avec la prise de conscience du dérèglement climatique récent, les travaux de modélisation en Antarctique ont sérieusement commencé. La recherche a d'abord concerné l'inlandsis de l'Antarctique (environ 14 millions de kilomètres carrés autour du pôle Sud), c'est-à-dire la glace recouvrant la terre ferme, puis les travaux se sont étendus au cas de la glace de mer.

Cette dernière est aujourd'hui intégrée dans les modèles climatiques mais de façon très simplifiée. En 2008, Ron Kwok, à l'institut de technologie de Californie, et ses collègues ont montré qu'il y avait des différences significatives entre les simulations de glace de mer et les observations par satellite. Il n'était cependant pas clair si ces problèmes venaient d'une modélisation imparfaite de la glace ou des approximations numériques des simulations. Nous manquions de données sur les propriétés de ces crêpes de glace pour en établir une représentation plus réaliste. Il y avait donc un besoin manifeste de mesurer les

■ ■
**À l'échelle du globe,
la glace de mer recouvre
entre 19 et 27 millions
de kilomètres carrés**
■ ■



8 caractéristiques de la glace de mer *in situ*, de développer une représentation fiable de ce matériau et de réexaminer les simulations numériques. C'est ce qui a motivé notre participation à l'expédition dans l'océan Antarctique en 2017.

Durant le voyage, un premier volet de recherche sur la glace de mer a concerné les images satellitaires et leur interprétation. Les climatologues utilisent ces images prises de l'espace pour estimer la quantité de glace de mer présente à tout moment. Cependant, nous n'avions que des correspondances approximatives entre l'état réel de la glace (sa densité ou la taille moyenne des crêpes) et les niveaux de gris sur les océans des images satellitaires. Pour y remédier, lors de notre expédition, il y avait en permanence deux personnes sur la plateforme d'observation du bateau pour recenser la glace de mer. Des caméras filmaient aussi l'océan, et une personne était chargée de changer les batteries toutes les heures, car leur autonomie est drastiquement réduite à cause du froid (avec des températures ressenties d'environ -20°C) : une opération très dangereuse, avec un risque non négligeable d'être emporté par-dessus bord à cause d'une vague déferlante ! Ce travail d'observation de la glace de mer a permis d'améliorer l'interprétation des données satellites qui sont ensuite exploitées dans les modèles prévisionnels.

Notre équipe s'est aussi appliquée à mesurer les propriétés de la glace de mer,

notamment sa compressibilité et sa résistance aux forces de torsion. En effet, parce qu'elle se forme en agglomérant des cristaux de glace, la crêpe de glace est poreuse, c'est-à-dire qu'elle présente des pores contenant soit de l'eau, soit de l'air. Dès lors, le matériau est compressible. Sous l'effet d'une force, les cristaux se réarrangent et combler les pores dans un premier temps. Le bloc de glace se déforme. Mais si la force continue d'être appliquée, il se brise. Nous voulions modéliser de façon réaliste la structure de la crêpe de glace et son comportement.

Pour cela, nous avons d'abord « pêché » des crêpes à l'aide d'un panier suspendu à une grue, une opération délicate qui a nécessité de nombreuses tentatives et plusieurs nuits afin de collecter assez de glace : malgré la mer agitée,

Pour déposer des bouées afin de suivre la dérive de la glace en fonction des courants marins ou faire des prélèvements, les chercheurs descendent du navire grâce à une grue (à gauche). Les carottes de glace sont analysées directement sur le bateau dans des conditions de stabilité qui ne sont pas toujours idéales (à droite).

À la fois compressible et viscoélastique, la glace est difficile à modéliser

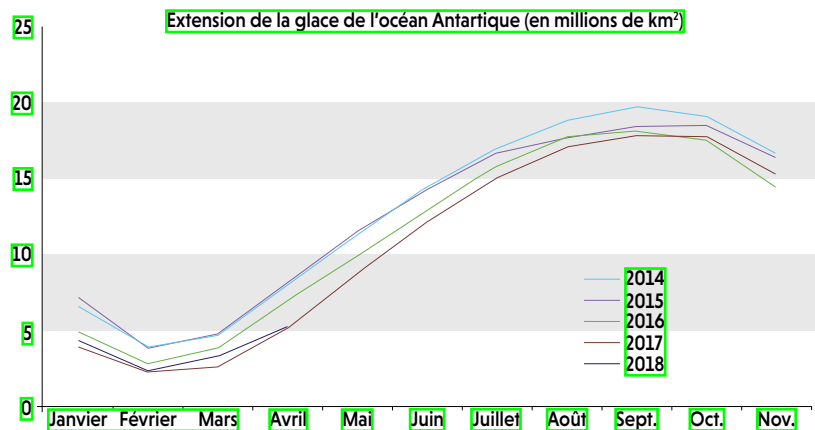
il fallait faire attention à ne pas cogner et endommager la coque du bateau. Ensuite, nous avons foré ces blocs, pour y prélever des carottes de glace uniformes (des cylindres de glace), une manipulation particulièrement acrobatique. Avec le bateau toujours en mouvement et ballotté par une mer parfois hostile, il fallait s'y mettre à plusieurs et tenir la personne réalisant l'opération de forage pour la stabiliser au maximum.

Ensuite, il fallait réaliser le test de torsion qui consiste à exercer une force de torsion sur une carotte de glace suivant l'axe du cylindre. Le matériau est alors soumis à une contrainte de cisaillement qui est nulle au centre du cylindre et maximale sur le bord. Pour une force appliquée donnée (plus précisément un moment de torsion), le cylindre se déforme d'autant plus qu'il est mou et compressible. Et il se casse plus ou moins rapidement en fonction de la déformation. En réalisant ce test sur un grand nombre d'échantillons, nous avons déterminé les caractéristiques mécaniques des crêpes de glace, en particulier le paramètre de fracture.

UNE NOUVELLE APPROCHE NUMÉRIQUE

Forts de ces données, nous les avons utilisées pour modéliser la glace de mer. Or ce matériau n'est pas seulement compressible, il présente, comme les glaciers, des caractéristiques viscoélastiques : à la fois visqueux (un comportement fluide qui résiste à un écoulement) et élastique (comportement solide de déformation réversible sous une contrainte). Les équations (aux dérivées partielles) qui décrivent un matériau présentant ces propriétés sont complexes. Il est donc impossible d'obtenir des solutions exactes et simples qui permettent de décrire le comportement de la glace.

Seul moyen : utiliser des approximations numériques pour résoudre ce type d'équations, comme la méthode des éléments finis, très souvent utilisée pour étudier des matériaux (pour résoudre les équations de diffusion de la chaleur, les équations de Maxwell pour étudier un champ électromagnétique, ou des équations qui décrivent les déformations mécaniques d'un objet). Son principe consiste à diviser l'objet d'étude en un nombre fini de petits volumes, des polyèdres nommés ici éléments finis. Leur petite taille permet alors de faire, dans chacun d'eux, des approximations permettant de résoudre les équations et d'obtenir une solution approchée du problème. Comme il y a un nombre fini de polyèdres, et donc un nombre fini d'équations pour cette approximation, il est possible de résoudre numériquement le problème avec un ordinateur. Il faut cependant s'assurer de la cohérence des résultats, par exemple, en vérifiant la continuité des



L'extension de la glace de mer en Antarctique atteint son minimum en février (la belle saison australe). Entre 2014 et 2018, la quantité de glace tend à diminuer.

résultats d'un polyèdre à ses voisins. Des outils mathématiques quantifient l'erreur maximale commise par l'approximation, même sans connaître la solution exacte. On doit aussi s'assurer que si l'on prenait des polyèdres de plus en plus petits, la solution approchée doit converger vers une solution cohérente.

Jusqu'à présent, les algorithmes utilisés pour étudier une mer de glace calculaient d'abord les déplacements des cristaux de glace dans l'eau à l'aide de la méthode des éléments finis, puis les tensions mécaniques au sein des agglomérations de cristaux étaient reconstruites dans un second temps. Par cette méthode, les approximations dans le calcul des déplacements se reportaient dans l'estimation des tensions, où elles pouvaient vite devenir importantes et fausser le résultat. Or il est clair que ces tensions jouent un rôle important dans la formation de la glace et son évolution.

Nous avons donc développé de nouveaux outils mathématiques qui reposent sur la méthode des moindres carrés, qui consiste à minimiser les erreurs. En outre, notre approche évalue simultanément les tensions et les déplacements dans les équations aux dérivées partielles du problème. Grâce aux données recueillies lors de notre expédition et ces outils, nous avons réalisé une simulation qui décrit comment des cristaux de glace dans la mer évoluent dans un système incluant des vents et des courants marins. Résultat : la modélisation des tensions dans la glace est meilleure que dans les approches précédentes.

Notre modèle reste à enrichir pour se rapprocher le plus possible des conditions réelles. Puis, si le modèle est validé, il restera à travailler avec des climatologues pour voir comment la glace de mer contribue à la dynamique globale dans le contexte du réchauffement climatique. ■

BIBLIOGRAPHIE

F. Bertrand, **Least-squares finite element method for sea-ice dynamics**, en ligne le 5 septembre 2018. <https://arxiv.org/abs/1809.01344>

V. Masson-Delmotte, **La fonte de l'Antarctique s'accélère**, *Pour la Science*, n° 490, août 2018.

A. Orsi, **Mille ans de variations climatiques en Antarctique**, *Pour la Science*, n° 458, décembre 2015.

L'ESSENTIEL

> Les interfaces cerveau-machine, ou ICM, peuvent envoyer ou recevoir des messages vers ou depuis le cerveau.

> Parvenir à un mouvement fluide et rapide d'une prothèse contrôlée par une ICM est toutefois très complexe.

> De nouvelles électrodes, implantées dans les aires du cerveau où naît l'intention du mouvement, permettent à des patients paralysés de contrôler plus finement le mouvement de la prothèse.

L'AUTEUR



RICHARD ANDERSEN
professeur de neurosciences et directeur de l'institut Tianqiao and Chrissy Chen de neurosciences à l'Institut de technologie de Californie, à Pasadena, aux États-Unis

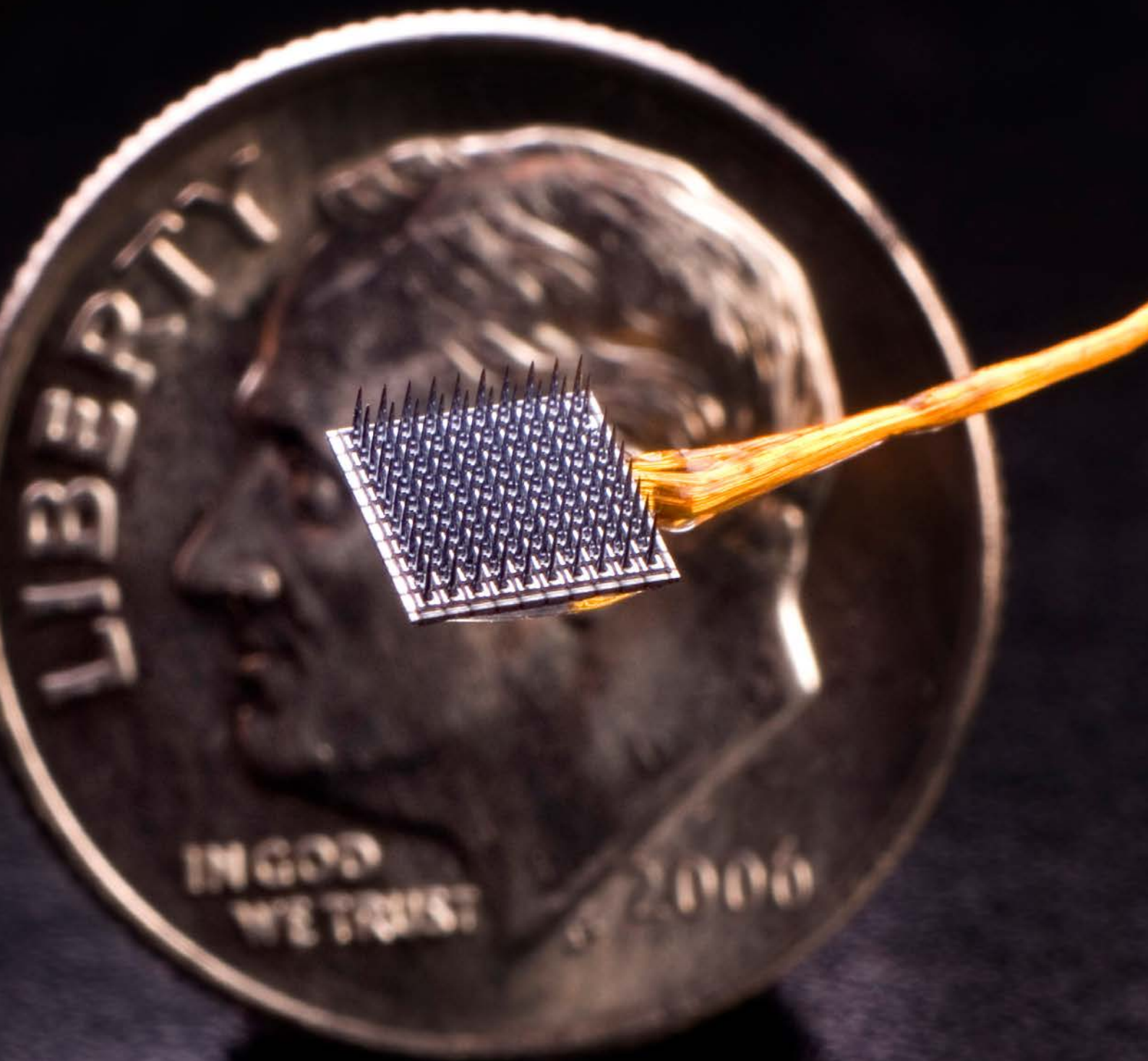
Quand les machines décodent nos intentions

Piloter une prothèse à la seule force de la pensée : c'est ce que permet un implant fiché dans la zone du cerveau qui crée nos intentions.

Un jour de 2014, dans mon laboratoire, Erik Sorto, paralysé après avoir été blessé par balle à l'âge de 21 ans, a utilisé sa pensée, et elle seule, pour boire une bière sans assistance, pour la première fois depuis plus de dix ans. Nous avions implanté en avril 2013 des électrodes dans son cerveau afin de contrôler les signaux nerveux que le cerveau produit pour déclencher les mouvements. Ce jour de 2014, une interface cerveau-machine (ICM) a envoyé un signal nerveux depuis une aire corticale de haut niveau. Un bras électromécanique s'est alors étendu jusqu'à la bouteille, l'a saisie et l'a portée aux lèvres d'Erik. Mes collègues et moi avons assisté, émerveillés, à l'accomplissement de cette tâche, incroyablement

complexe en dépit des apparences. Un chercheur qui partage avec les patients leur joie de pouvoir déplacer un bras robotisé pour interagir avec le monde physique ressent une indéniable satisfaction personnelle.

Cette scène fait aussi naître immédiatement de nombreuses interrogations sur la manière dont des pensées peuvent contrôler une prothèse mécanique. Tous les jours, nous bougeons sans y réfléchir. L'objectif d'une ICM perfectionnée est de parvenir à effectuer ces mouvements avec aisance. À cette fin, des neuroscientifiques tentent depuis des dizaines d'années de décoder les signaux nerveux qui amorcent les gestes comme celui de tendre le bras et saisir un objet. Des avancées réelles, bien que limitées, ont stimulé de nouvelles voies d'exploration de l'activité électrique qui foisonne lorsque les



Grâce à une minuscule grille rassemblant une centaine de petites électrodes et implantée dans le cerveau, une personne paralysée peut contrôler un bras robotique.

86 milliards de neurones de notre cerveau communiquent. La nouvelle génération d'ICM porte en elle la promesse d'une association étroite entre cerveau et prothèse, en ciblant avec une grande précision les zones cérébrales qui sont à l'origine de l'action.

Les ICM peuvent faire deux choses: «lire» les signaux nerveux dans le cerveau et les utiliser pour commander un bras robotisé, ou «écrire» dans le cerveau, en captant des informations dans l'environnement et en les faisant parvenir au cerveau. Les ICM qui «écrivent», appelées *write-in* en anglais, utilisent la stimulation électrique pour transmettre un signal au tissu cérébral. Des applications de cette technologie sont déjà utilisées. C'est le cas des prothèses cochléaires, qui stimulent le nerf auditif pour permettre à des personnes atteintes de surdité d'entendre à nouveau. La stimulation profonde d'une aire cérébrale qui contrôle l'activité motrice, les ganglions de la base, permet de traiter des troubles moteurs comme ceux de la maladie de Parkinson ou le tremblement essentiel. Des appareils qui stimulent la rétine sont en cours d'essais cliniques pour traiter certaines formes de cécité.

DU CERVEAU AU ROBOT

À l'inverse, les ICM de la seconde catégorie, dites *read-out*, qui «lisent» et enregistrent l'activité nerveuse, en sont encore au stade de développement. Il faut d'abord franchir les obstacles de la lecture des signaux nerveux avant que cette technologie de nouvelle génération ne puisse bénéficier aux patients. Des techniques de lecture existent déjà, mais elles sont encore grossières. Certes, l'électroencéphalogramme (EEG) enregistre l'activité de quelques centimètres de tissu cérébral où s'activent plusieurs millions de neurones. Toutefois, il s'agirait plutôt d'enregistrer l'activité de neurones individuels impliqués dans un circuit cérébral unique. L'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), quant à elle, est un outil de mesure indirect qui enregistre une augmentation du flux sanguin dans une région active du cerveau. On obtient ainsi des images plus fines que celles des EEG, mais toujours d'assez faible résolution. Les variations de flux sanguin sont des phénomènes lents et les IRMf ne peuvent suivre des changements rapides d'activité dans le cerveau.

L'idéal serait de parvenir à enregistrer l'activité de neurones individuels. Suivre l'évolution de l'activité d'un grand nombre de neurones individuels permet d'obtenir une image très fine de l'activité d'une région bien définie du cerveau. Ces dernières années, l'implantation de fines électrodes a rendu possible ce type d'enregistrement. Les grilles utilisées actuellement sont des surfaces planes de 4 millimètres sur 4 qui comportent 100 électrodes. Ces électrodes, longues de 1 à 1,5 millimètre,

forment une sorte de tapis de clous qui enregistre l'activité de 100 à 200 neurones.

Les signaux captés par ces électrodes sont ensuite transmis à des «décodeurs», qui utilisent des algorithmes mathématiques pour traduire différents schémas d'activation de neurones individuels en un signal qui sert ensuite à piloter un appareil, tel qu'un membre robotisé ou un ordinateur.

Notre laboratoire concentre ses recherches sur les personnes tétraplégiques, donc totalement paralysées après une lésion dans la partie supérieure de la moelle épinière. Nous enregistrons l'activité d'une partie du cortex cérébral, une zone d'environ 3 millimètres d'épaisseur à la périphérie des deux hémisphères du cerveau. Si on le mettait à plat, le cortex de chaque hémisphère atteindrait une surface de 80 000 millimètres carrés. Le nombre d'aires corticales connues en charge du contrôle d'une fonction cérébrale dépasse aujourd'hui 180. Ces zones traitent l'information sensorielle, communiquent avec d'autres régions impliquées dans des fonctions cognitives, prennent des décisions ou envoient l'ordre de déclencher une action.

Une interface cerveau-machine peut interagir avec de nombreuses aires du cortex. Parmi elles, les aires corticales primaires, qui détectent des entrées sensorielles telles que l'angle et l'intensité de la lumière frappant la rétine ou une sensation provenant de la terminaison d'un nerf périphérique. Les ICM peuvent aussi interagir avec les aires associatives hyperconnectées du cortex qui sont spécialisées dans le langage, la reconnaissance des objets, les émotions et le contrôle du processus de décision.

Quelques équipes ont déjà commencé à suivre l'activité de populations de neurones individuels chez des patients paralysés, ce qui leur a permis de piloter une prothèse en laboratoire. Mais il reste à franchir des obstacles majeurs avant que l'on puisse équiper un patient d'une neuroprothèse aussi facilement que d'un pacemaker. Mon équipe s'est spécialisée dans l'étude des aires intercorticales plutôt que dans les aires motrices, étudiées par d'autres. Nous espérons que cela permettra de détecter plus rapidement et précisément le déclenchement des signaux nerveux qui transmettent l'intention d'un patient.

Nous nous concentrons sur le cortex pariétal postérieur, où sont amorcés nos mouvements. Nos travaux chez les singes nous ont permis d'identifier une sous-région du cortex pariétal postérieur, le cortex intrapariétal latéral, qui perçoit notre intention de bouger les yeux. D'autres régions du cortex pariétal postérieur enclenchent les mouvements des membres. Par exemple, la PRR (*parietal reach region*) prépare ceux du bras. Certaines, comme l'aire intrapariétale antérieure, sont impliquées dans la préhension des objets, comme l'a montré une étude



Les interfaces cerveau-machine développées par l'auteur (à gauche) et son équipe ont permis à Erik Sorto (à droite) de bouger un bras robotisé.

menée par Hideo Sakata, à la faculté de médecine de l'université Nihon, au Japon.

Le cortex pariétal postérieur présente plusieurs avantages potentiels pour le contrôle cérébral de robots ou d'ordinateurs. Premièrement, il contrôle les deux bras, alors que le cortex moteur de chaque hémisphère n'active que le membre du côté opposé. Il donne aussi une indication sur le but du mouvement. Chez le singe, quand l'animal fixe son regard sur un objet donné, l'aire s'active immédiatement pour signaler sa position. Le cortex moteur, lui, indique la direction à suivre pour que le membre atteigne l'objet. Connaître le but d'une action motrice permet à l'ICM de la décoder rapidement, en deux ou trois dixièmes de seconde, alors qu'interpréter le signal de trajectoire émis par le cortex moteur peut prendre plus d'une seconde.

Passer d'expériences sur des animaux à des études du cortex pariétal postérieur humain n'a pas été simple. Quinze ans se sont écoulés avant que nous réalisions le premier implant humain. Nous avons d'abord implanté chez des singes sains la même grille d'électrodes que celle que nous voulions implanter chez les patients. Les singes ont rapidement appris à contrôler un ordinateur ou une prothèse.

Pour notre projet sur des volontaires humains, qui a reçu l'agrément des autorités veillant au respect des règles de sécurité et d'éthique dans les structures concernées, nous avons formé une équipe de scientifiques, de cliniciens et de professionnels de la rééducation de l'institut de technologie de Californie (ou Caltech),

de l'université de Californie du Sud, de l'université de Californie à Los Angeles (UCLA), du centre de rééducation Ranchos Los Amigos et de l'hôpital et centres de soin Casa Colina.

En première ligne de notre projet, les volontaires sont de réels pionniers, car ils n'ont pas l'assurance d'en retirer un bénéfice. Ils s'engagent pour aider les futurs utilisateurs de cette technologie, qui en bénéficieront une fois qu'elle sera adaptée à un usage quotidien. Pour Erik Sorto, notre premier volontaire, l'implantation chirurgicale a eu lieu en avril 2013 et a été effectuée par les neurochirurgiens Charles Liu et Brian Lee. L'opération s'est déroulée sans problème, puis nous avons dû attendre la cicatrisation avant de pouvoir tester le dispositif.

UN APPRENTISSAGE INTUITIF

Mes collègues du Jet Propulsion Laboratory de la Nasa, qui avaient conçu et lancé des robots à destination de Mars, m'avaient parlé des sept minutes d'angoisse durant lesquelles le vaisseau qui emporte le robot pénètre dans l'atmosphère de la planète avant de se poser à sa surface. Pour moi, ce furent deux longues semaines d'inquiétude, à me demander si les implants allaient fonctionner. Nous connaissions certes le fonctionnement des aires cérébrales similaires chez les primates non humains, mais avec un implant humain, nous entrons en territoire inconnu. Personne n'avait encore tenté un enregistrement à partir d'une population de neurones du cortex pariétal postérieur.

Le premier jour du test, nous avons détecté une activité neuronale et à la fin de la semaine, nous avions suffisamment de signaux pour commencer à déterminer si Erik pourrait contrôler un membre robotisé. L'activité de certains neurones était modifiée lorsqu'Erik imaginait faire pivoter sa main. Sa première tâche a consisté à tourner la main du robot dans différentes directions pour serrer celle d'un étudiant. Il était ravi (et nous aussi), car c'était la première fois qu'il interagissait avec le monde depuis son accident.

Les gens s'interrogent souvent sur le temps nécessaire pour apprendre à se servir d'une interface cerveau-machine. Le principe d'utilisation de la technologie s'est révélé immédiatement compréhensible. Exploiter les signaux d'intention du cerveau pour contrôler le bras robotisé s'est fait simplement et de manière intuitive. En imaginant différentes actions, Erik pouvait voir les enregistrements de neurones individuels de son cortex et les « allumer » ou les « éteindre » à volonté.

Bien maîtriser le contrôle du bras demande plus de temps. Au début de l'étude, nous avons demandé aux participants ce qu'ils aimeraient réaliser en contrôlant un robot. Erik voulait être capable de boire une bière seul, sans avoir à demander l'aide de quiconque. Un défi qu'il

➤ a relevé au bout d'un an environ, sous les applaudissements et les cris de joie des témoins.

Grâce au concours d'une équipe codirigée par Spencer Kellis, de Caltech, qui comprenait des roboticiens du Laboratoire de physique appliquée de l'université Johns-Hopkins, nous avons croisé les signaux d'intention d'Erik avec la puissance de traitement fournie par la vision artificielle et la robotique intelligente. L'algorithme de vision analyse les données transmises par des caméras et l'intelligence du robot combine le signal d'intention avec des algorithmes pour amorcer le mouvement du bras robotisé. Ces premiers résultats ont ensuite été publiés dans la revue *Science* en 2015.

Erik n'est pas le seul utilisateur de notre technologie. Nancy Smith, qui participe à notre étude depuis quatre ans, est devenue tétraplégique après un accident de voiture il y a une dizaine d'années. Auparavant, elle enseignait l'infographie au lycée et jouait du piano. Notre étude, réalisée sous la direction de Tyson Aflalo, de Caltech, et Nader Pouratian, de l'UCLA, a montré une représentation individuelle détaillée de chaque doigt des deux mains dans le cortex pariétal postérieur de Nancy. En s'appuyant sur la réalité virtuelle, celle-ci pouvait imaginer bouger individuellement les dix doigts d'avatars de mains (une gauche et une droite) présentées sur un écran. En imaginant les mouvements de cinq doigts d'une main, Nancy pouvait jouer des mélodies simples sur un clavier virtuel de piano.

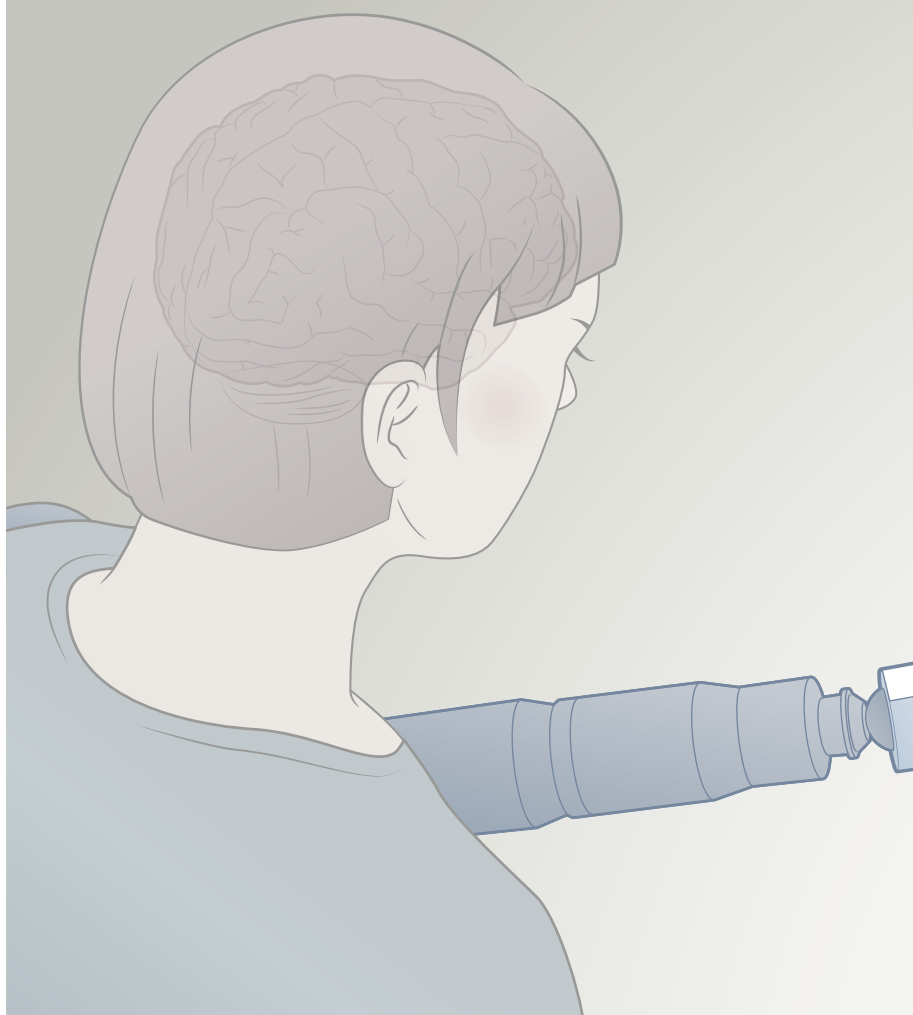
COMMENT LES NEURONES RÉVÈLENT LES INTENTIONS

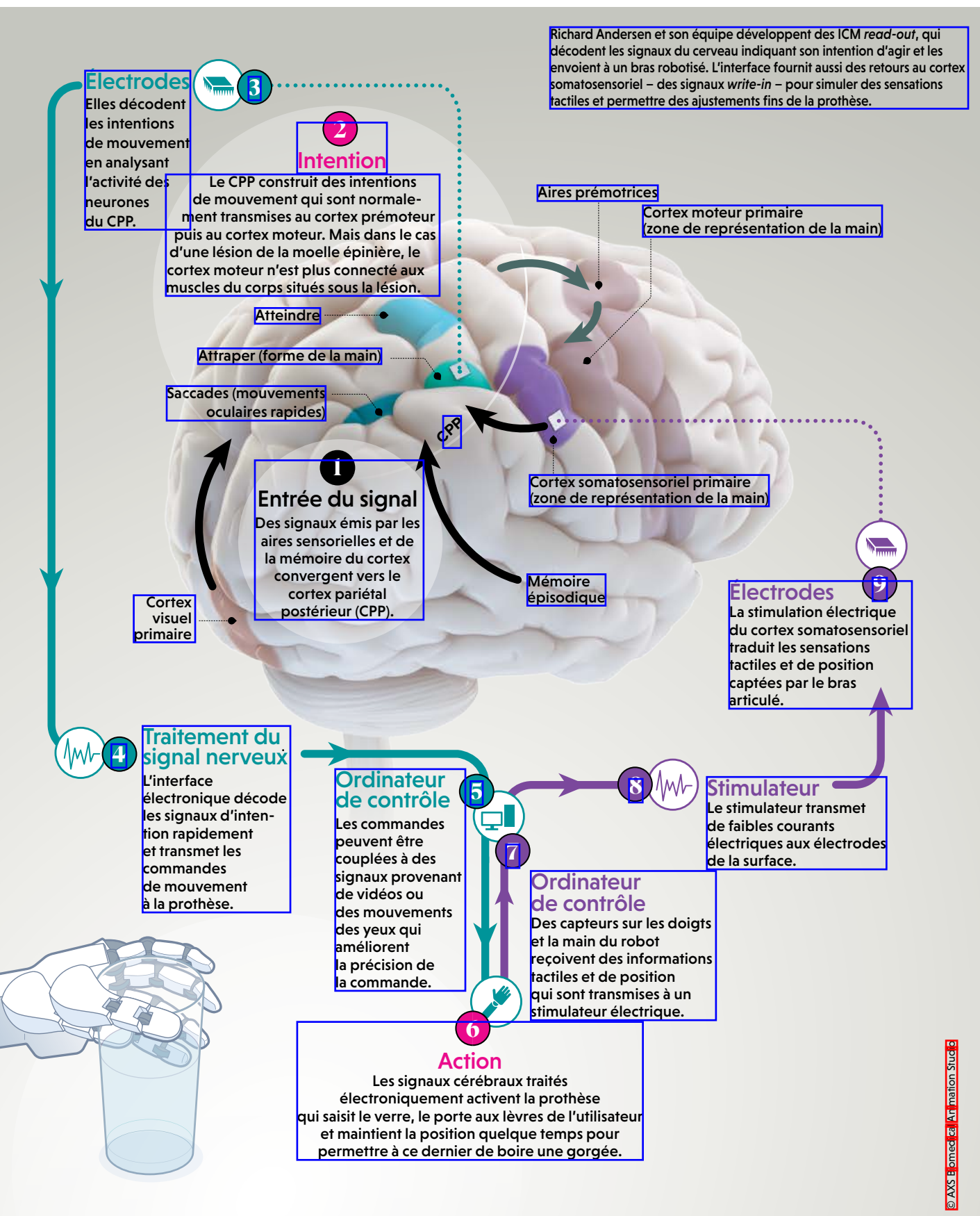
Travailler avec ces patients nous a permis d'étudier les neurones engagés dans le traitement de signaux relatifs aux intentions. La quantité d'informations fournie par les quelques centaines de neurones impliqués s'est révélée colossale. À partir de cela, nous avons réussi à décoder un grand nombre d'activités cognitives, comme établir une stratégie mentale (imaginer des mouvements sans les faire), bouger les doigts, attraper un objet, observer la position des mains pour saisir un objet ou encore réaliser des calculs mathématiques. Étonnamment, implanter quelques minuscules grilles d'électrodes nous a permis de décoder de nombreuses intentions d'une personne.

Quelle quantité d'information peut être enregistrée à partir d'un petit échantillon de tissu cérébral ? Cette question me rappelait un problème que j'avais déjà rencontré au début de ma carrière. J'étais alors postdoctorant dans l'équipe de Vernon Mountcastle, à la faculté de médecine Johns-Hopkins, et nous étudions la représentation de l'espace visuel dans le cortex pariétal postérieur de singes. L'œil humain ressemble à une caméra, avec une rétine photosensible qui nous indique la localisation des stimuli visuels. L'image entière est appelée

À LA FORCE DE LA PENSÉE

Depuis quinze ans, les chercheurs développent des interfaces cerveau-machine (ICM) qui permettent entre autres de contrôler des prothèses grâce à des signaux nerveux. La technologie a progressé lentement, car traduire le signal électrique émis par les neurones en commandes pour bouger un bras robotisé est une opération extrêmement complexe. L'équipe de l'auteur à l'institut de technologie de Californie (Caltech) a tenté d'accélérer le développement des neuroprothèses en se concentrant sur les processus neuronaux complexes, qui amorcent l'action, et en envoyant l'activité électrique correspondante à un bras robotisé. Au lieu d'envoyer les signaux du cortex moteur pour bouger un bras, ces chercheurs ont fait le pari de placer des électrodes dans le cortex pariétal postérieur (CPP), qui transmet à la prothèse les intentions d'agir du cerveau. En effet, utiliser les signaux issus du CPP, c'est-à-dire au plus haut niveau de la chaîne de commande, permet un contrôle plus rapide et plus performant de la prothèse.





▢ carte rétinotopique. Les neurones sont associés à des zones précises de la rétine, appelées champs récepteurs. Pour d'autres aspects, en revanche, le traitement de la perception visuelle diffère de celui d'un enregistrement vidéo. Quand une caméra balaie une scène, l'image se déplace aussi, alors que lorsque nous bougeons les yeux, le monde paraît stable. C'est que l'image rétinotopique qui provient des yeux est ensuite convertie en une représentation visuelle de l'espace qui tient compte de la position de ce que nos yeux observent, de sorte que lorsque nous les bougeons, le monde ne semble pas se déplacer.

Le cortex pariétal postérieur est un centre de traitement majeur des données visuospatiales. S'il est endommagé, il devient très difficile d'atteindre ou saisir un objet. Au laboratoire de Vernon Mountcastle, nous avons montré que des neurones individuels de cette zone ont des champs récepteurs qui enregistrent une partie de la scène. Les mêmes cellules enregistrent aussi des informations sur la position des yeux. Ces deux signaux interagissent en croisant les données visuelles avec celles de la direction du regard. Le produit des deux est appelé champ de gain.

J'ai continué à m'intéresser à la représentation cérébrale de l'espace quand j'ai pris mon premier poste à l'institut Salk d'études biologiques. Avec David Zipser, un neuroscientifique théoricien de l'université de Californie à San Diego, nous avons décrit dans la revue *Nature* un modèle computationnel de réseau de neurones artificiels qui combine l'activation de certaines zones rétinotopiques avec la direction du regard pour créer des cartes de l'espace indépendantes du mouvement des yeux. Durant la phase d'entraînement des réseaux de neurones, les couches intermédiaires développent des champs de gain, comme dans les expériences avec le cortex pariétal postérieur. En combinant les signaux des données visuelles et de la position des yeux dans les mêmes neurones, nous avons découvert que neuf neurones suffisent à représenter l'intégralité du champ visuel.

Récemment, cette idée de représentations combinées – des populations de neurones qui réagissent à des variables multiples (comme dans les champs de gain) – a suscité un vif intérêt.

Ces travaux pourraient en outre expliquer ce qui se passe dans le cortex pariétal postérieur. Un jour, nous avons demandé à Nancy, en utilisant un ensemble d'instructions écrites, de réaliser huit combinaisons différentes d'une tâche. L'une d'elles nécessitait d'élaborer des stratégies pour imaginer ou réaliser une action. Une autre, d'utiliser la partie droite ou gauche du corps. Une troisième, de s'entraîner à serrer la main de quelqu'un ou de hausser une épaule. Nous avons découvert que les neurones du

Une neuroprothèse doit émettre des signaux du cerveau vers la machine, et inversement

cortex pariétal postérieur combinent toutes ces données et que leur intégration présente un schéma d'activité bien précis, différent de la façon dont ces variations interagissent au hasard dans les expériences réalisées avec des animaux de laboratoire.

LA SÉLECTIVITÉ COMBINÉE DES NEURONES

L'activité des populations de neurones servant à élaborer des stratégies et celle utilisée pour contrôler chaque côté du corps ont tendance à se chevaucher. Si un neurone s'allume pour amorcer un mouvement de la main gauche, il est probable qu'il s'active aussi pour amorcer un mouvement de la main droite, alors que les groupes de neurones qui contrôlent l'épaule ou la main sont plus indépendants. On parle de sélectivité partiellement combinée. Nous avons depuis découvert des similitudes dans des représentations partiellement combinées qui pourraient constituer une sémantique du mouvement.

L'activité des cellules activées pour le même type d'action tend aussi à se chevaucher. Un neurone qui s'allume devant la vidéo d'une personne en train de saisir un objet s'allumera aussi probablement à la lecture du mot « saisir ». Les cellules qui répondent à une action comme celle de pousser, elles, ont tendance à être regroupées au sein du même groupe. En général, le codage partiellement combiné est mis en jeu pour les fonctions qui se ressemblent (les mouvements de la main gauche sont similaires à ceux de la main droite). Il sépare aussi celles qui montrent différentes formes de traitement neuronal (un mouvement de l'épaule diffère d'un mouvement de la main).

Les codages combinés et partiellement combinés ont été mis en évidence dans certaines zones du cortex associatif. Des études seront nécessaires pour savoir s'ils apparaissent aussi

dans les zones qui gouvernent le langage, la reconnaissance des objets et les fonctions exécutives. Nous aimerions aussi savoir si l'aire sensorielle primaire et l'aire corticale motrice utilisent les mêmes structures partiellement combinées.

Un autre objectif à court terme est de découvrir dans quelle mesure les nouveaux apprentissages peuvent affecter les performances des volontaires qui utilisent la prothèse. Si l'apprentissage se fait facilement, n'importe quelle aire cérébrale pourrait être implantée d'électrodes et entraînée pour n'importe quelle tâche réalisée par une interface cerveau-machine. Un implant dans le cortex visuel primaire pourrait ainsi apprendre à contrôler des tâches non visuelles. Mais si l'apprentissage est plus limité, un implant, posé par exemple dans une aire motrice, ne pourrait être entraîné que pour des tâches motrices. De premiers résultats suggèrent, de façon générale, qu'un implant devrait être placé dans la zone qui a été préalablement identifiée comme contrôlant l'activité cognitive ciblée.

Une ICM doit savoir faire plus que recevoir et traiter des signaux cérébraux. Elle doit aussi envoyer un retour depuis la prothèse vers le cerveau. Quand nous tentons de saisir un objet, le retour visuel aide à guider la main vers la cible. La position de la main dépend de la forme de l'objet. Si la main ne reçoit pas d'informations tactiles ou de position du membre lorsqu'il commence à manipuler l'objet, les performances se dégradent rapidement.

Il est fondamental de pallier ce manque pour nos volontaires qui ont subi une lésion de la moelle épinière et qui non seulement ne peuvent plus bouger les parties inférieures de leur corps mais ne peuvent non plus percevoir de sensation tactile, ni la position de leur corps dans l'espace, autant d'éléments essentiels à un mouvement fluide. Une neuroprothèse doit donc être à même de compenser cette perte en émettant des signaux dans les deux directions: du cerveau vers la machine, pour transmettre l'intention du volontaire, et de la machine vers le cerveau, pour lui fournir les informations tactiles et de position captées par le membre robotisé.

Robert Gaunt et ses collègues de l'université de Pittsburg se sont attaqués à ce problème en implantant, chez une personne tétraplégique, une série de microélectrodes dans le cortex somatosensoriel, une région où sont traitées les informations tactiles qui proviennent des membres. Les chercheurs ont ensuite envoyé un courant électrique faible à travers ces microélectrodes et le sujet a ressenti des sensations à la surface de sa main.

À notre tour, nous avons utilisé des implants dans la zone du cortex somatosensoriel recevant les sensations du bras. Nous avons été agréablement surpris de constater que le

patient a perçu des sensations naturelles de pression, de tapotement et de vibrations sur la peau. Il a également senti son bras bouger – sensation qui correspond à la proprioception. Ces expériences montrent que les personnes qui ont perdu les sensations de leurs membres peuvent les recouvrer grâce à des ICM qui les impriment dans leur cerveau. La prochaine étape consistera à utiliser des mains de robot bardées de capteurs pour voir si le retour somatosensoriel améliore la dextérité du membre robotisé sous le contrôle du cerveau. Nous aimerions aussi savoir si les sujets ressentent une impression d'intégration, comme si le bras robotisé devenait une partie de leur corps.

AMÉLIORER LES ÉLECTRODES

Un autre défi majeur consiste à améliorer la capacité des électrodes à envoyer et à recevoir des signaux nerveux. Nous avons découvert que les implants fonctionnent pendant cinq ans environ. Cependant, avec de meilleures électrodes, on pourrait accroître la longévité de ces systèmes et augmenter le nombre de neurones associés. L'augmentation de la longueur des électrodes, qui est une autre priorité, permettrait d'atteindre des zones situées dans les replis du cortex.

Par ailleurs, avec des électrodes flexibles, qui suivent les légers déplacements du cerveau, dus par exemple à des variations de la tension artérielle, la stabilité des enregistrements s'améliorera. Aujourd'hui, il faut parfois recalibrer le décodeur, car il arrive que les électrodes rigides se décalent légèrement par rapport aux neurones d'un jour à l'autre, alors que l'on aimerait suivre l'activité de populations identiques de neurones sur plusieurs semaines, voire plusieurs mois.

Enfin, les implants doivent être miniaturisés, fonctionner à faible puissance (pour ne pas avoir à chauffer le cerveau) et sans fil, pour éviter d'avoir à relier l'outil au tissu cérébral. L'implantation de toutes les interfaces actuelles nécessite une opération chirurgicale. Mais nous espérons qu'un jour seront mises au point des interfaces d'enregistrement et de stimulation capables d'envoyer et de recevoir des signaux à travers le crâne avec des performances égales à celles des électrodes actuelles implantées chirurgicalement.

Ce n'est qu'à ce moment-là, lorsque nous aurons mis au point des techniques non invasives, capables de détecter avec précision l'activité de neurones individuels, qu'une amélioration sera atteinte. Les ICM, élaborées dans l'objectif d'aider les personnes paralysées, atteindront-elles un jour le niveau de la technologie fantasmée par les livres de science-fiction, les films et les médias, qui serait utilisée pour améliorer l'humain et lui conférer des «superpouvoirs» lui permettant de courir plus vite et sauter plus haut? À l'heure actuelle, nous en sommes encore loin. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Armenta Salas et al., **Proprioceptive and cutaneous sensations in humans elicited by intracortical microstimulation**, *eLife*, vol. 7, article e32904, 2018.

S. Flesher et al., **Intracortical microstimulation of human somatosensory cortex**, *Science Translational Medicine*, vol. 8, article 361ra141, 2016.

T. Aflalo et al., **Decoding motor imagery from the posterior parietal cortex of a tetraplegic human**, *Science*, vol. 348, pp. 906-910, 2015.

L. Hochberg et al., **Reach and grasp by people with tetraplegia using a neurally controlled robotic arm**, *Nature*, vol. 485, pp. 372-75, 2012.

R

ENDEZ-VOUS

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

DES TROUS À ENTOURER AVEC PARCIMONIE

Laisser des trous dans un assemblage de carrés en minimisant le nombre de pièces utilisées: ce problème de géométrie n'est pas facile. Mais le cheminement vers sa solution illustre bien la démarche des mathématiciens.

L'AUTEUR



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



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

Le tâtonnement et la construction progressive de la solution d'une énigme géométrique d'apparence simple sont les sujets de cette rubrique. L'objectif est d'illustrer les diverses étapes qu'un mathématicien doit franchir pour comprendre un problème, et l'intérêt de passer de la découverte d'une solution dont on vérifie la justesse à la certitude qui ne s'obtient qu'en élaborant une démonstration. Ainsi, le travail de recherche comporte plusieurs phases plus ou moins entremêlées:

a) La prise de contact avec le problème, sa formulation claire et le traitement de quelques cas particuliers.

b) La prise de conscience des difficultés et l'approfondissement de l'exploration, conduisant à la découverte de régularités et à la formulation d'hypothèses.

c) La mise au point d'une réponse vraisemblable accompagnée de quelques calculs pour formuler la solution.

d) L'élaboration d'une démonstration complète, nécessitant une compréhension approfondie du problème et l'introduction d'idées nouvelles. Lors de cette phase, on démontre parfois des résultats intéressants, au-delà de la question initiale.

e) La formulation d'autres problèmes proches que la méthode trouvée permet de traiter, ou qui sont liés mais demanderaient un travail nouveau.

Nous nous intéresserons aux formes du plan composées de pièces carrées de côté

unitaire, posées côté contre côté que nous dénommerons ici «formes» (voir l'encadré 1).

Posons-nous la question: pour un entier n donné, combien faut-il au minimum de carrés pour assembler une forme présentant n trous? Nous noterons $f(n)$ ce nombre minimal.

Pour que le problème soit bien défini, précisons que des trous distincts ne doivent pas se toucher, et que seuls comptent les trous totalement entourés de carrés. Nous pourrions adopter d'autres conventions, mais elles définiraient d'autres problèmes.

EXPÉRIMENTATION

La première chose à faire est de résoudre le problème pour les petites valeurs de n . Pour $n=1$, $n=2$ et $n=3$, c'est simple. Il est clair que l'on ne peut pas faire mieux que les formes dessinées sur les figures 2a, 2b, 2c. On a donc $f(1)=8$, $f(2)=13$, $f(3)=18$. Remarquons que pour $n=3$, il y a trois figures différentes de 18 carrés comportant trois trous.

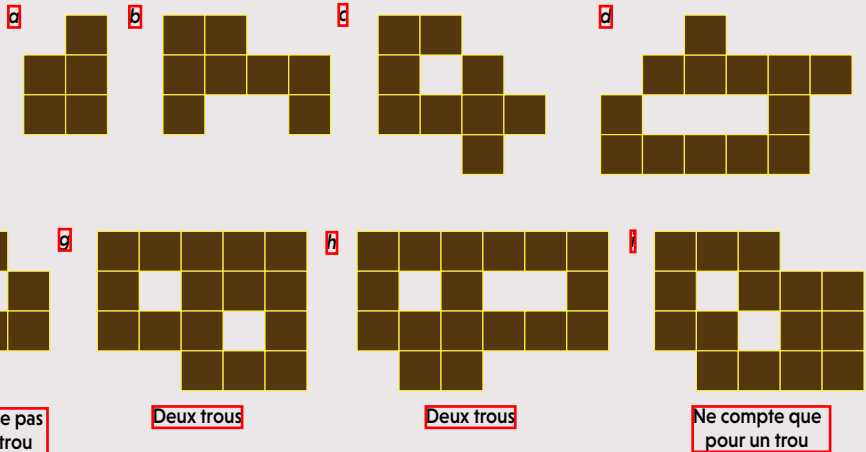
Ces premiers cas pourraient suggérer que l'on a, pour tout entier n , $f(n+1)=f(n)+5$. Avec $f(1)=8$, cela conduirait à la formule générale $f(n)=3+5n$ et donc à $f(4)=23$. C'est faux! Il semble plutôt que $f(4)=21$ (voir la figure 2f).

Pour $n=4$, on gagne quelque chose en renonçant à aligner les trous. Pour $n=5$ et 6, il n'est pas possible de faire mieux que 26 et 29.

Pour $n=5$, il faut à nouveau ajouter 5 au résultat précédent ($f(5)=26$), mais pour $n=6$, il suffit d'ajouter 3, puisque $f(6)=29$. La règle semble obscure: parfois on doit ajouter 3 au résultat précédent, parfois il faut ajouter 5.

DES FORMES TROUÉES AVEC DES CARRÉS

Dar définition, une « forme » désigne ici un assemblage de pièces carrées collées côté contre côté (a, b, c, d). La définition des trous est précisée par les figures e, f, g, h, i .



On continue donc aussi soigneusement que possible. On pourrait concevoir un programme informatique qui résoudrait de manière certaine les cas envisagés en explorant toutes les combinaisons possibles pour des valeurs de n fixées. Cependant, il ne donnerait pas la solution pour tout n , et surtout il ne donnerait pas de démonstration. Par ailleurs, les situations pour n assez petit ne sont pas très compliquées et on a peu de doute sur les valeurs qu'on découvre par tâtonnements. Pour y voir clair, on constitue, sans être absolument certain de sa justesse, un tableau dont voici les premières valeurs.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f(n)$	8	13	18	21	26	29	34	37	40	45
n	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$f(n)$	48	51	56	59	62	65	70	73	76	79
n	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$f(n)$	84	87	90	93	96	101	104	107	110	113
n	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
$f(n)$	118	121	123	127	130	133	138	141	144	147

QUELLE EST LA RÈGLE ?

L'observation attentive suggère une hypothèse pour les ajouts de 3 ou de 5 d'un cas au suivant. On note en effet que les ajouts sont successivement: +5 +5 +3 +5 +3 +5 +3 +3 +5 +3 +3 +3 +3 +5 +3 +3 +3 +5 ...

Les +5 sont isolés (sauf au tout début) et séparés par des séquences de +3 dont la longueur s'accroît d'une unité une fois sur deux:

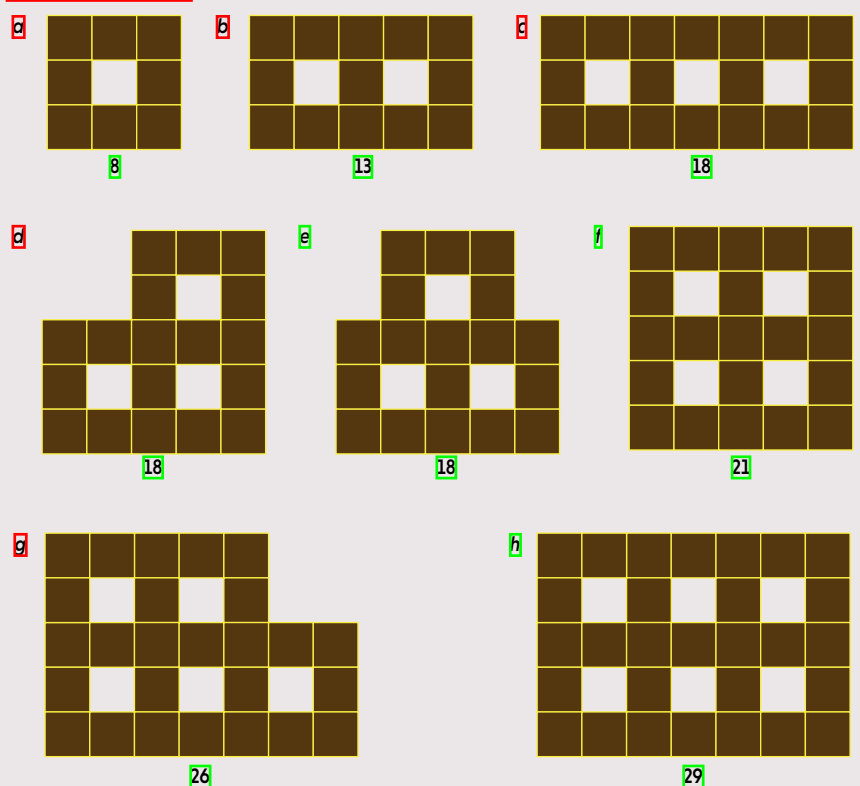
1 1 2 2 3 3 4 4 5 5 ...

Si l'on ne s'est pas trompé dans le tableau, cela pourrait être la solution, mais comment être certain que cette règle observée est juste? Et si oui, quelle pourrait en être la raison?

L'expérience acquise dans la résolution sans démonstration des premiers cas suggère

LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

Te problème est de trouver, pour chaque entier positif n , le nombre minimum $f(n)$ de carrés qu'il faut utiliser pour créer une forme (au sens indiqué dans l'encadré 1) dotée de n trous. On a représenté sur les figures a, b, c, d, e, f, g, h les solutions pour les valeurs du nombre n de trous égales à 1, 2, 3, 4, 5, 6. Pour ces valeurs, les nombres de carrés sont, respectivement, 8, 13, 18, 21, 26, 29.



qu'on peut créer un nouveau trou avec 5 carrés (en construisant une rangée, ou barre, de trous, comme celles des figures 2a, 2b, 2c, ou en commençant une nouvelle barre), mais que parfois on peut s'en sortir avec seulement 3 carrés nouveaux à la condition de s'appuyer à la fois sur une barre déjà construite et sur un trou déjà construit de la nouvelle barre.

Simplifions le problème. Nous n'envisagerons que des constructions fonctionnant en partant d'une barre horizontale de base, puis en posant de nouvelles barres de même longueur sur la première tant que c'est possible. Nous les appellerons « formes standard » (voir la figure 3d). Nous envisageons ces formes particulières, car nous avons l'impression que nous ne pouvons avoir mieux que ce qu'elles donnent. Il faudra nous en assurer plus tard.

En construisant une forme standard pour un nombre donné n de trous, avec le but d'utiliser le minimum de carrés pour créer des trous, deux objectifs s'opposent. Pour avoir le plus de trous exigeant 3 nouveaux carrés, nous avons intérêt à avoir une barre horizontale de base aussi longue que possible (car le premier trou d'une nouvelle barre nécessite l'ajout de

5 carrés et les autres de la même barre seulement 3; il est donc intéressant de limiter le nombre total de barres. Cependant, chaque trou supplémentaire de la première barre horizontale coûte 5 carrés, il faudrait donc limiter aussi la longueur de la première barre horizontale. La question est donc: pour minimiser le nombre de carrés utilisés, faut-il minimiser le nombre de barres mises les unes sur les autres, ou minimiser la longueur de la première barre construite?

Pour répondre, comptons. Le nombre de fois que nous devons utiliser 5 carrés pour un nouveau trou est égal au nombre de trous de la première barre moins 1 (le premier trou exige huit carrés), auquel on additionne le nombre de barres moins 1 (puisque la première barre est déjà comptée). Si l'on n'envisage que des formes standard, pour avoir le minimum de carrés, il faut donc minimiser la somme $l-1+h-1$ (où l est le nombre de trous de la première barre et h le nombre de barres), ce qui revient à minimiser la somme $l+h$ avec la contrainte que $lh \geq n$ pour qu'il y ait n trous.

Sous réserve de démontrer qu'on ne peut pas mieux faire que ces formes standard, le minimum de carrés pour n trous sera obtenu

3

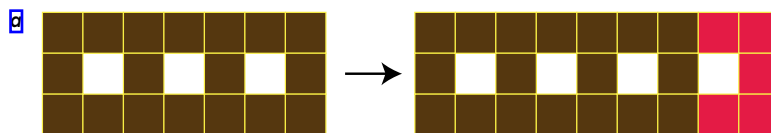
TROIS CARRÉS, CINQ CARRÉS ET FORMES STANDARD

Quand on construit une barre (ou rangée) de trous, 5 carrés sont nécessaires pour chaque nouveau trou (a). De même, quand on crée une nouvelle barre de trous posée sur des barres déjà construites, le premier trou exige 5 carrés (b).

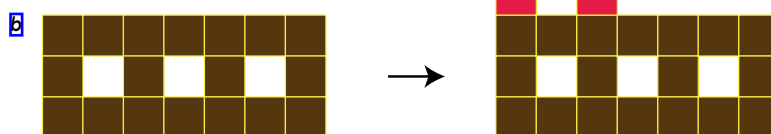
En revanche seuls 3 nouveaux carrés sont nécessaires si l'on s'appuie sur une barre déjà créée en même temps qu'on s'appuie sur un trou déjà créé de la barre de trous (c).

Dans un premier temps, pour traiter le problème, on se limite aux formes composées de barres horizontales de trous, posées les unes sur les autres et de même longueur, sauf éventuellement la dernière.

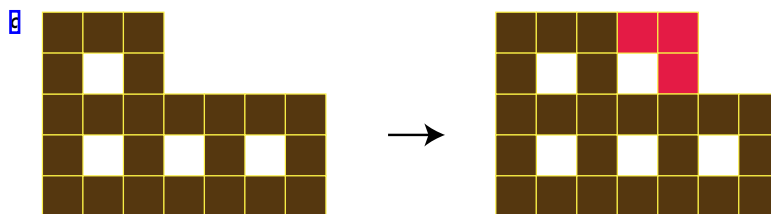
Ces formes particulières (d) sont dénommées « formes standard ». On fait le pari qu'on ne peut pas faire mieux que ces formes standard... ce que l'on démontrera.



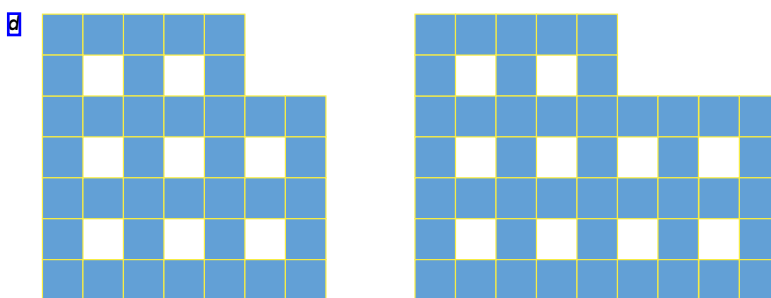
5 carrés nécessaires



5 carrés nécessaires



3 carrés nécessaires



Formes standard

par la construction d'une forme de ce type vérifiant $lh \geq n$ et $l+h$ minimum.

NOMBRES DE CARRÉS COMPOSANT UNE FORME STANDARD

Si nous avons raison de ne considérer que des formes standard, la réponse $f(n)$ est le nombre de carrés de ces formes. Pour une forme standard, il faut $3n$ carrés, car chaque trou demande au moins trois carrés nouveaux. À ces $3n$, nous devons ajouter 5 pour le premier trou qui demande 8 carrés, puis ajouter 2 pour chacun des autres trous de la première barre, donc $2(l-1)$, et enfin ajouter 2 pour chaque premier trou de chaque barre après la première, donc $2(h-1)$. Au total, une forme standard de n trous demande $3n+5+2(l-1)+2(h-1)=3n+2l+2h+1$ carrés, où l est le nombre de trous de la première barre horizontale et h le nombre de barres horizontales. La forme sera la meilleure possible pour n trous si $lh \geq n$ et $l+h$ minimum.

Vérification de la formule. Pour $n=1$, nous avons $l=h=1$, donc $3n+2l+2h+1=8$ carrés, ce qui est le résultat attendu. Pour $n=4$, on a $l=h=2$, donc $3n+2l+2h+1=12+4+4+1=21$. Cela correspond à nos dessins et au tableau.

Nous sommes sur une bonne piste; reste à justifier l'hypothèse sur les formes standard et à résoudre la minimisation de $l+h$, avec $lh \geq n$.

VIEUX RÉSULTATS SUR LES DISQUES ET LES RECTANGLES

Un entier n étant donné, comment déterminer dans le cas général deux entiers l et h tels que $lh \geq n$ avec $l+h$ minimum?

Une idée vient à l'esprit: il faut faire le plus carré possible, donc l et h les plus égaux possible. Le problème est analogue aux problèmes des courbes fermées délimitant une aire donnée: la courbe ayant la plus petite longueur pour une aire fixée est le cercle. Ce résultat, dénommé théorème des isopérimètres, est dû à Jacques Bernoulli qui, sans le démontrer d'une manière parfaitement satisfaisante, en a eu clairement conscience. Seul le xx^e siècle réussira à produire une preuve complète de l'énoncé.

Une question plus proche encore de la nôtre et plus simple à traiter rigoureusement a été abordée dès l'Antiquité par Zénodore au iv^e siècle avant notre ère. Il se demandait quel polygone à c côtés (c fixé) délimitant une aire fixée possède le plus petit périmètre. La réponse est le polygone régulier à c côtés. Dans le cas $c=4$, cela signifie que parmi tous les rectangles délimitant une aire donnée (et même plus généralement parmi tous les quadrilatères), le carré est celui de plus petit périmètre. C'est presque la question qui nous occupe ici.

Pour le problème des trous, nous obtenons que les nombres entiers l et h tels que $lh \geq n$ avec $l+h$ minimum (c'est la même chose que minimiser le périmètre de rectangles de côtés l et h)



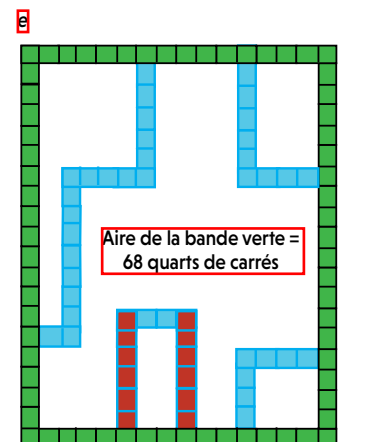
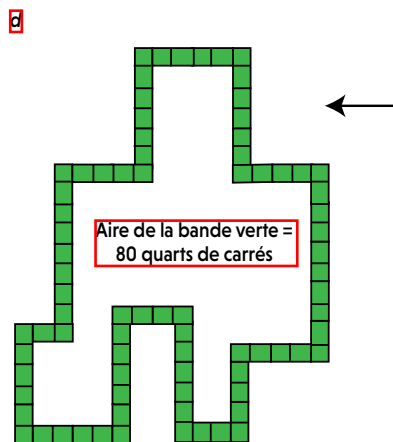
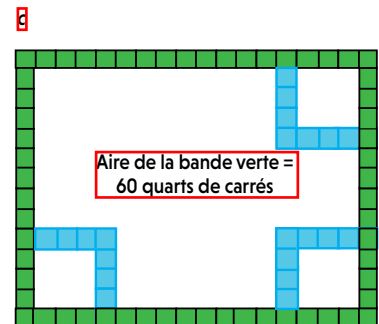
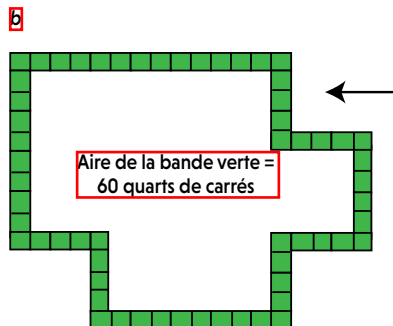
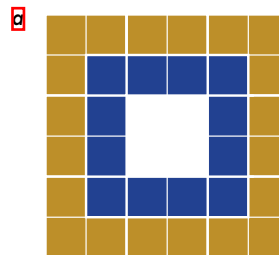
BORDER UN TROU ET UNE FORME

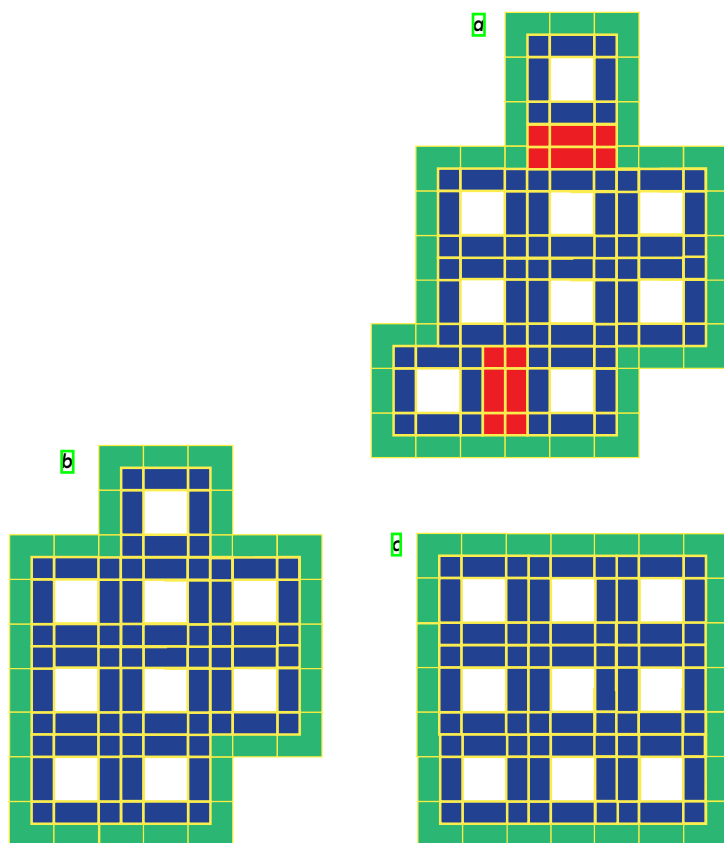
À chaque trou, on associe une bande de largeur 1/2 qui l'entoure (a). Pour un trou de côté 1, l'aire de cette bande (en bleu foncé) est 3. Les bandes associées à des trous différents ne se chevauchent pas. Pour obtenir n trous, il faut donc au moins $3n$ pièces carrées.

La bande de largeur 1/2 (en vert) qui suit le pourtour d'une forme contenue dans un

rectangle de hauteur H et de largeur L est d'aire $H+L-1$ s'il n'y a pas de renforcement (b); on le démontre en enlevant des coins (c). L'aire de la bande verte est plus grande s'il y a des renforcements (d; les carrés rouges du renforcement n'ont pas de correspondants, e).

Notons que la bande qui suit le pourtour ne chevauche aucune des bandes bordant les trous.





5

ESPACES PERDUS

La forme à 9 trous (a) faite de 48 carrés comporte deux espaces perdus (en rouge) qui ne sont ni la bordure d'un trou ni la bordure du périmètre.

La forme à 9 trous (b) utilise 42 carrés sans espace perdu, mais avec une mauvaise disposition des trous carrés.

La forme optimale pour 9 trous utilise 40 carrés (c) : il n'y a pas d'espace perdu et la disposition des trous est optimale.

▢ sont ceux correspondant aux formes les plus carrées, donc ceux où l et h sont les plus égaux possible. Ici, cela donne $l=h$, ou bien l diffère de h d'une unité. L'intuition que le carré est la meilleure façon de faire est confirmée. Une démonstration directe de cette propriété arithmétique est possible.

Exemples. Pour avoir $lh \geq 8$ avec $l+h$ minimal, il faut prendre $l=h=3$. Pour avoir $lh \geq 11$ avec $l+h$ minimal, il faut prendre $l=3$ et $h=4$ ou $l=4$ et $h=3$. Notons que, parfois, d'autres couples éloignés de plus d'une unité font aussi bien que ceux éloignés de 0 ou 1 unité (mais ils ne font pas mieux). Ainsi, pour avoir $lh \geq 10$ avec $l+h$ minimal, on trouve $l=3$ et $h=4$ ou $l=4$ et $h=3$, mais on a aussi $l=5$ et $h=2$, ou $l=2$ et $h=5$.

Où en sommes-nous de notre problème ? Il semble que nous détenons la solution, mais nous ne l'avons pas démontrée, car nous avons recherché des solutions uniquement en

considérant des formes standard. N'y a-t-il pas des formes d'un autre type faisant mieux que les formes standard ? Il faut prouver que non.

L'AIRE MINIMALE EXIGÉE ET RÉSERVÉE PAR TROU

Une idée consiste à examiner l'aire minimale de pièces carrées qu'entraîne inévitablement la présence d'un trou en prenant en compte que, d'après les règles du jeu, chaque trou doit être entièrement entouré de pièces carrées. Chaque trou de côté 1 doit par exemple être entouré de 8 carrés exactement. Certains de ces carrés pourraient être utilisés en même temps pour entourer d'autres trous ; on ne peut donc pas dire que chaque trou impose au moins huit carrés. En revanche, si l'on découpe chaque pièce carrée en quatre carrés plus petits de côté $1/2$, on peut affirmer que les petits carrés de côté $1/2$ qui bordent le trou ne pourront pas border un autre trou. Il y a 12 petits carrés de côté $1/2$ qui bordent un trou de 1 carré. Leur aire est 3 (car $12 \times 1/4 = 3$) ; ils forment une bande de largeur $1/2$ autour du trou, et chaque petit carré de cette bande est réservé pour le trou qu'il borde (voir l'encadré 4).

Il faut donc au moins une aire de $3n$ unités pour constituer l'ensemble des bandes autour de n trous ; et bien sûr, pour cette aire de $3n$ unités, il faut au moins $3n$ pièces carrées. Pour des trous ayant une aire supérieure à 1, il faut réserver un nombre plus grand de petits carrés pour la bande le bordant, mais chaque trou exigera au moins 3 pièces carrées pour lui et donc n trous exigeront dans le meilleur des cas $3n$ carrés. Cela démontre que $f(n) \geq 3n$.

Nous savons aussi que, grâce aux formes standard, nous pouvons faire n trous avec $3n+2l+2h+1$ pièces carrées, $lh \geq n$ et $l+h$ minimal ; autrement dit, $f(n) \leq 3n+2l+2h+1$. Nous pourrions conclure si nous réussissons à améliorer l'inégalité $f(n) \geq 3n$ que nous venons d'obtenir avec les bandes autour des trous.

La solution va provenir de la prise en considération du périmètre des formes. Toute forme a un pourtour, et la bande d'épaisseur $1/2$ qui suit ce pourtour n'est jamais utile pour entourer un trou. L'aire de cette bande dépend du périmètre de la forme.

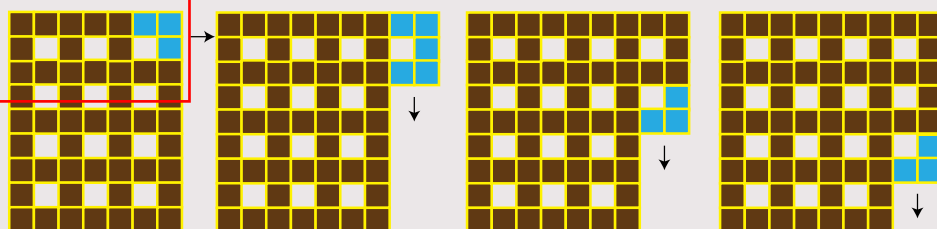
On montre que cette bande a une aire au moins égale à $H+L-1$, où H et L sont la hauteur et la largeur du plus petit rectangle contenant la forme (voir l'encadré 4). Or pour faire tenir n trous qui ne se touchent pas, il faut au moins une hauteur $2h+1$ et une largeur $2l+1$ avec $hl \geq n$. L'aire de toutes les bandes d'épaisseur $1/2$ autour des trous et le long du périmètre est donc au moins égale à $3n+(2l+1)+(2h+1)-1 = 3n+2l+2h+1$, avec $lh \geq n$ et $l+h$ minimal.

La bande de largeur $1/2$ qui suit le pourtour d'une forme contenue dans un rectangle de hauteur H et de largeur L a une aire égale à

6

FORMES OPTIMALES

Construction progressive de formes standard optimales : il faut trois carrés de plus pour chaque nouveau trou, sauf pour passer de n^2 à $n^2 + 1$ et de $n(n+1)$ à $n(n+1) + 1$, où cinq carrés sont nécessaires.



$H+L-1$ s'il n'y a pas de renforcement (figures 4b et 4c), et une aire plus grande s'il y en a (figures 4d et 4e). On démontre cette propriété en considérant l'opération consistant à enlever un coin à un rectangle.

Miracle! Nous retrouvons exactement l'expression du nombre de carrés d'une forme standard à n trous. Conclusion: on ne peut pas faire mieux qu'utiliser ce nombre de carrés, et avec les formes standard, on y arrive. Nous avons donc prouvé que $f(n) = 3n + 2l + 2h + 1$ avec $lh \geq n$ et $l+h$ minimal.

L'encadré 5 montre les diverses situations possibles quand on crée des trous et qu'on dessine les bandes d'épaisseur $1/2$. Dans le cas général, en dehors de ces bandes pour les trous et le périmètre, il y a des bouts de surface qui ne sont utilisés par aucune bande. Ces parties en rouge sur le dessin correspondent en quelque sorte à de la surface perdue. Dans le cas des figures optimales et en particulier dans le cas des formes standard, aucune surface n'est perdue: tout bout de la surface des pièces carrées est utilisé, soit pour border un trou, soit pour border le périmètre. L'intuition, acquise pendant la phase d'exploration du problème, que les formes standard les plus carrées permettent de créer n trous en utilisant un minimum de pièces carrées est démontrée! Le tâtonnement, la recherche de solutions, l'intuition géométrique et la démonstration se sont rejoints.

REMARQUES SUR LA SUITE DES NOMBRES $f(n)$

En étudiant la suite de nombres $f(n)$, on remarque que pour passer de $f(n)$ à $f(n+1)$, on ajoute toujours 3, sauf quand on passe de n^2 à n^2+1 et de $n(n+1)$ à $n(n+1)+1$, auxquels cas il faut ajouter 5.

L'encadré 6 illustre cette propriété avec la construction progressive de formes standard les plus carrées possible: partant d'un carré

pour ajouter un trou, on ne peut faire autre chose que d'utiliser 5 pièces. De même en partant d'une forme standard de $n(n+1)$ trous.

On démontre que:

- si $n = h^2$, $f(n) = 3h^2 + 4h + 1$;
- si $n = h^2 + m$ avec $0 < m \leq h$, alors

$$f(n) = 3h^2 + 4h + 3m + 3;$$

- si $n = h^2 + m$ avec $h < m \leq 2h + 1$, alors

$$f(n) = 3h^2 + 4h + 3m + 5.$$

La suite $f(n)$ figure-t-elle dans l'encyclopédie des suites numériques de Neil Sloane (<https://oeis.org/book.html>)? Oui, car... je l'ai ajoutée. C'est la suite <https://oeis.org/A319879>. Avant que je ne m'intéresse à ce problème de trous, personne en mathématiques n'avait semble-t-il rencontré cette suite numérique.

AUTRES PROBLÈMES DU MÊME TYPE

Parmi les problèmes liés à celui que nous venons de traiter ou le généralisant, mentionnons:

- la variante consistant à rechercher le nombre minimal de carrés nécessaires pour que l'aire totale des trous soit n ;
- la variante consistant à utiliser une définition plus souple de la notion de trou, sans imposer par exemple que deux trous ne se touchent pas;
- les variantes consistant à remplacer les pièces carrées par des pièces ayant la forme d'un triangle équilatéral, ou d'un hexagone régulier;

les généralisations dans l'espace avec des cubes, ou en dimension supérieure;

- le dénombrement des solutions optimales.

Les trois premières variantes et les généralisations en dimensions supérieures se traiteront probablement de manière analogue aussi bien pour la découverte de la solution que pour sa démonstration. Le problème du dénombrement des solutions est sans doute assez difficile. ■

BIBLIOGRAPHIE

G. Villemin, **Le problème de la reine Didon**, <https://bit.ly/2VtBE7u>

Théorème isopérimétrique, Wikipédia, https://fr.wikipedia.org/wiki/Théorème_isopérimétrique

Didon, Wikipédia, <https://fr.wikipedia.org/wiki/Didon>

L'AUTEUR



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

DES BULLES ET DES CELLULES

La Société française de physique a organisé un concours d'images scientifiques. Parmi des centaines de propositions, le jury a désigné quatre lauréats.

P

lus de 360 ! C'est le nombre de candidatures reçues pour le concours « Beautiful science » organisé par la Société française de physique (SFP) à l'occasion de son 25^e congrès général qui se tiendra en juillet à Nantes. La compétition, ouverte à tous (les participants avaient de 9 à 87 ans !) et portant sur toutes les sciences, a mis en lice images, vidéos et sons sur le thème : montrer la science dans ce qu'elle a de plus beau et de plus élégant, de l'infiniment petit à l'infiniment grand.

L'événement avait pour parrain le collectif *Obvious* (Pierre Fautrel, Hugo Caselles-Dupré et Gauthier Vernier) qui s'était illustré il y a quelques mois par la vente record d'une de leurs toiles conçues par intelligence artificielle : *Le Portrait d'Edmond de Bellamy* fut adjugé à plus de 432 500 dollars chez Christie's.

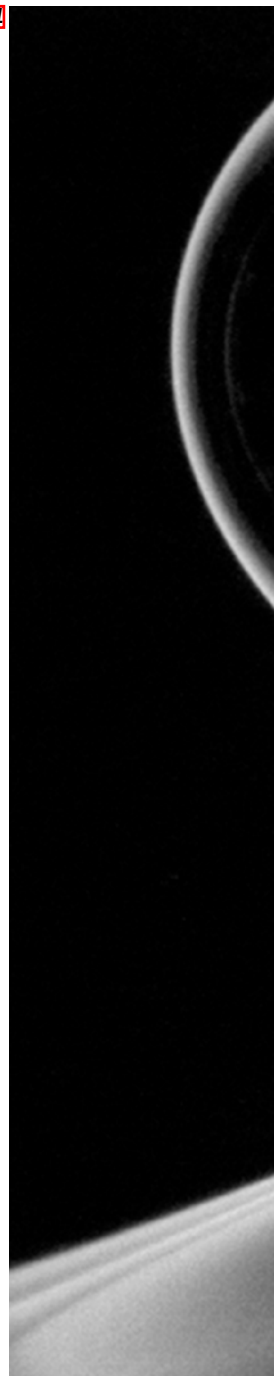
Le 28 mai, le jury s'est donc réuni et a délibéré en quelques heures pour, finalement, désigner quatre lauréats sur des critères d'esthétisme, d'originalité et d'étonnement suscité. Le premier est Antoine Lagarde, en deuxième année de thèse en mécanique des fluides, à Paris. Sa photographie, intitulée *Dans l'intimité d'une frontière franchie* (1), montre une bulle d'air qui traverse une interface séparant eau et huile.

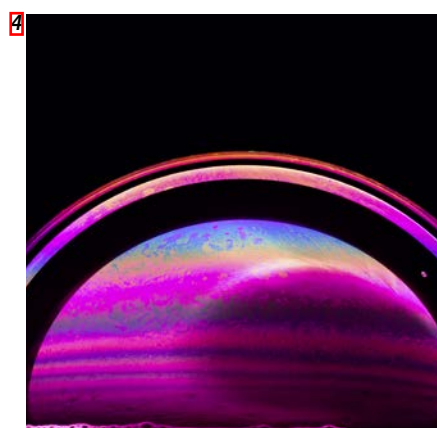
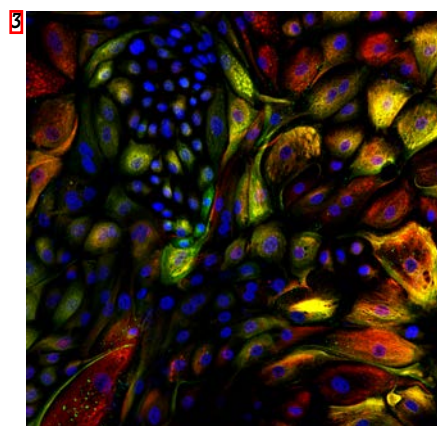
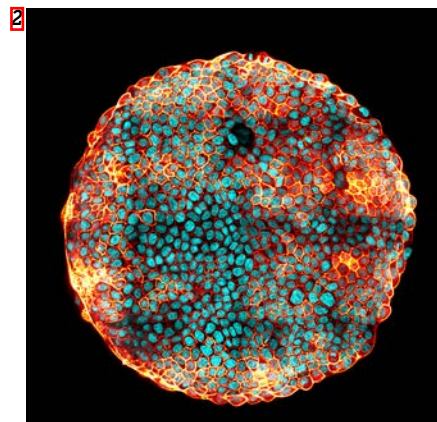
Le deuxième prix est allé à *Îlot de cellules* (2), de Nicolas Harmand, David Pereira et Sylvie Hénou, respectivement doctorant, postdoctorant en biophysique

Les quatre images
lauréates du concours
Beautiful Science.

et professeure en microrhéologie cellulaire. Des cellules épithéliales d'un rein de chien sont cultivées sur un gel de polyacrylamide où des protéines d'adhérence sont disposées en disques de façon à contraindre la croissance cellulaire. En microscopie confocale à fluorescence, les noyaux des cellules apparaissent en bleu et les contours en jaune.

À la troisième place, deux *ex aequo*. D'abord, *Hallucination cellulaire* (3), de Martine Batailler, assistante ingénieure en neuroendocrinologie à l'Inra. Là encore, il s'agit d'une culture cellulaire, même si le





© A. Lagarde/N. Harmand, C. Héron/M. Baraër/H. K. et

rendu est cette fois beaucoup moins ordonné. On distingue en vert et en rouge deux protéines du cytosquelette (l'armature des cellules), et en bleu le noyau des cellules après coloration de l'ADN.

Ensuite, *Planète sous cloche* (4), de Hubert Klein, maître de conférences en physique à Marseille. Par sa photographie, il met en évidence les points communs entre une bulle de savon et l'atmosphère d'une planète, notamment les phénomènes de turbulence. De fait, les tourbillons et les variations d'épaisseur (que trahissent les différentes couleurs) saisis

au sommet d'une bulle de savon évoquent les planètes gazeuses (Jupiter, Uranus, Neptune...) du Système solaire.

Les gagnants verront leurs œuvres exposées lors du congrès de la SFP à Nantes. Vous pouvez aller les voir et juger par vous-mêmes. Vous aurez alors peut-être envie de participer au prochain concours! ■

Le site du concours:
www.beautifulsience.fr
Le site du Congrès de la SFP:
www.sfp2019.fr



L'auteur a publié:
**Pollock, Turner, Van Gogh,
Vermeer et la science...**
(Belin, 2018)

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY et ÉDOUARD KIERLIK
professeurs de physique à Sorbonne Université, à Paris

LE MYSTÈRE DES PIERRES QUI BOUGENT

Grâce à une conjonction improbable de conditions climatiques et de configurations de terrain, des roches se déplacent toutes seules de plusieurs mètres en quelques minutes.

Racetrack Playa, un lac temporaire dans le parc américain de la Vallée de la Mort, en Californie, est le siège d'un phénomène déconcertant. Des centaines de roches s'y déplacent en laissant sur le sol des traces rectilignes, longues de plusieurs dizaines de mètres et dont le parallélisme et les points anguleux suggèrent que leurs mouvements sont synchrones...

Ces déplacements ne se produisent dans ce lieu difficile d'accès que lors de très rares épisodes, parfois séparés de plusieurs années. Aussi les chercheurs n'ont-ils pu résoudre l'énigme que récemment, en équipant des pierres de capteurs de géolocalisation et en disposant autour du lac des caméras.

Le lieu, l'un des rares dans le monde à présenter le même phénomène, est bien particulier: Racetrack Playa est un

lac de quelques kilomètres carrés alimenté uniquement par les pluies. L'eau s'en échappe ensuite par infiltration et évaporation. La conséquence est l'absence de courant, d'où un fond particulièrement plat et horizontal, constitué de sable fin, de vase et d'argile.

UNE MORNE PLAINE BALAYÉE PAR LES VENTS

Lorsque ce lac est à sec, on peut y voir de nombreux cailloux et rochers de taille allant jusqu'à 50 centimètres. Beaucoup sont à l'extrémité de traces sur le sol, comme s'ils s'étaient déplacés tout seuls. Comment est-ce possible?

La présence d'un fond limoneux, particulièrement glissant lorsqu'il est humide, suggère que les rochers les plus plats glisseraient facilement dessus. Certaines mesures le confirment: le coefficient de frottement statique sur le sol humide est de l'ordre de 0,15, alors

Pour déterminer la cause des déplacements des roches, les chercheurs ont équipé certaines pierres de capteurs de position et autres instruments.

que pour des matériaux secs usuels (bois, métal...), il est plutôt de l'ordre de 0,5 ou 0,6. Cela signifie qu'il suffit d'appliquer une force horizontale égale à 0,15 fois leur poids pour déplacer ces roches. Mais d'où viendrait cette force?

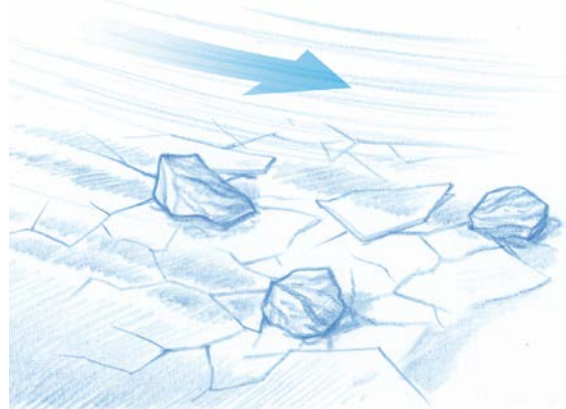
Sur le sol, aucune trace de pas d'animaux. Le vent? Faisons une estimation grossière. Une roche cubique de 15 centimètres de côté pèse quelque 9 kilogrammes et requiert donc une poussée horizontale de 13 newtons pour bouger. Cela correspond à des vents d'environ 30-35 mètres par seconde – des vitesses supérieures à celles des vents qui sévissent à cet endroit.





LA SOLUTION DE L'ÉNIGME

À la suite de ses observations et mesures sur des pierres équipées de capteurs, l'équipe de Richard Norris, aux États-Unis, a proposé en 2014 un scénario qui résout le mystère des pierres qui bougent. Selon ce scénario, les pierres sont poussées par les mouvements des plaques de glace formées lors d'une nuit froide. Ces plaques se rompent le jour et sont elles-mêmes poussées par le vent, grâce à la très grande surface globale qu'elles lui offrent et aux enchevêtrements qui se créent. Les mouvements de l'eau liquide, également dus au vent, contribuent aussi à la poussée des plaques de glace.



Puisque, comme plusieurs études l'ont confirmé, le vent ne suffit pas, il faut chercher d'autres ingrédients.

DES PIERRES PORTÉES PAR DES RADEAUX DE GLACE ?

Notamment en analysant les périodes de l'année où se produisent ces déplacements – en hiver, lorsque le lac peut geler –, le géologue tchèque Gunther Kletetschka et ses coauteurs ont formulé en 2013 une nouvelle hypothèse.

Elle s'appuie sur le fait que la conductivité thermique de la roche est quatre fois supérieure à celle de l'eau. Imaginons qu'au moment du gel, l'eau soit à un

niveau tel que le haut du rocher est encore bien émergé.

Dans ce cas, puisque la chaleur diffuse bien à travers la roche, cette dernière se retrouvera rapidement et intégralement à une température inférieure à 0 °C. L'eau qui est à son contact peut geler et ainsi former une gangue de glace autour de la partie immergée du caillou. De plus, ce gel peut s'étendre en dessous du rocher, les sédiments et la vase étant aussi très humides.

Et comme le niveau d'eau du lac fluctue avec les apports d'eau en provenance de toute la zone environnante, cet ensemble « rocher + radeau de glace »

peut se détacher du fond et se mettre à flotter (voir l'encadré page suivante).

Avec notre cube de 15 centimètres, et si on oublie la fragilité mécanique de la glace, il faudrait un radeau de glace de 4 centimètres d'épaisseur sur un peu moins de 1500 mètres carrés pour le faire flotter grâce à la poussée d'Archimède.

C'est considérable. Mais même avec un radeau plus petit, notre rocher pourrait se trouver suffisamment allégé pour

Les auteurs ont récemment publié :
En avant la physique !,
une sélection de leurs
chroniques (Belin, 2017).



être poussé par le vent. Les traces parallèles et uniformes des rochers proches les uns des autres semblent confirmer cette hypothèse: ils seraient tous pris dans le même radeau; ils ne rouleraient pas en se déplaçant, mais frotteraient sur le fond.

Hélas, les campagnes d'observations ont invalidé ce séduisant scénario. Les trajectoires de rochers proches ne sont en fait pas parfaitement parallèles: elles s'écartent ou se rapprochent légèrement, et on en déduit que ces rochers ne sont pas solidaires du même bloc de glace.

D'autres éléments viennent infirmer l'hypothèse du radeau. L'épaisseur de glace nécessaire pour assurer la flottaison semble plus importante que celle ayant cours d'habitude dans ce lac. Ensuite, lorsque les températures sont négatives et que tout le lac gèle et se recouvre de glace, les mouvements deviennent impossibles; il faut que la glace se brise pour que les plaques se mettent à dériver. Or dès que le soleil point, les pierres s'échauffent bien plus vite que l'eau et c'est donc autour d'elles que la glace fond le plus vite: les pierres se détachent de leur radeau avant que celui-ci ait le temps de bouger! Enfin, les traces au sol se révèlent trop profondes pour être dues à un attelage pierre-glace allégé.

POUSSÉES PAR DES PLAQUES DE GLACE

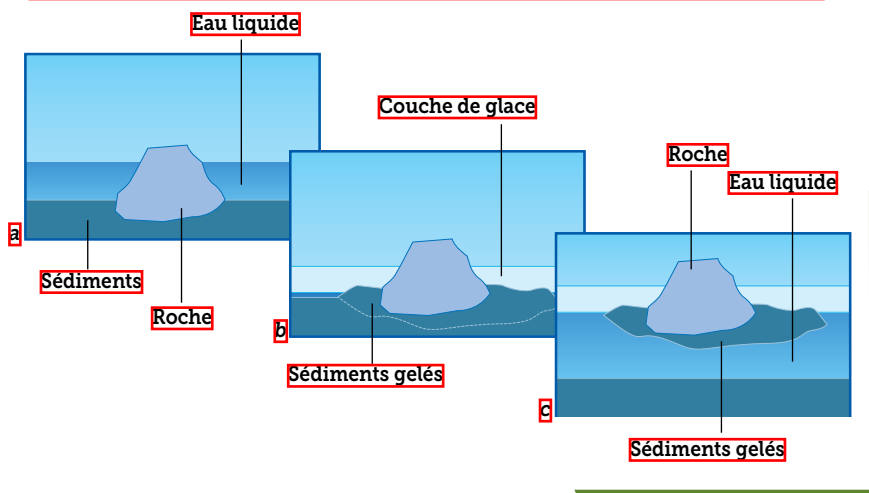
L'énigme a persisté notamment parce que les observations étaient très difficiles. En effet, même en imaginant être sur place au bon moment, il est difficile à l'œil nu de distinguer les lents mouvements de rochers (1 à 2 mètres par minute) dans un paysage dépourvu de points de repère. C'est en équipant des rochers de balises de géolocalisation, d'enregistreurs et de capteurs de température que l'Américain Richard Norris, de l'institut Scripps d'océanographie, et ses collègues ont pu comprendre le phénomène.

La position et la température étaient enregistrées toutes les heures jusqu'à ce qu'un mouvement soit détecté grâce à un déclencheur magnétique enterré dans le sol, sous les rochers équipés. L'enregistrement passait alors en mode continu et des caméras placées en divers endroits filmaient.

Ces chercheurs ont alors constaté que les mouvements se produisaient par des jours clairs et ensoleillés, après des nuits où la température était descendue en dessous de 0 °C. À la mi-journée, la chaleur et le vent brisaient la mince couche de glace qui s'était formée durant la nuit. Ce

UN SCÉNARIO ERRONÉ

Selon un scénario proposé en 2013, une roche posée sur le lac est dans un premier temps partiellement immergée (a). Quand la température baisse suffisamment, l'eau gèle, ainsi que la roche et les sédiments qui sont à son contact (b). Avec l'arrivée d'eau liquide, un radeau de glace solide de la roche et des sédiments associés se détache et se met à flotter au-dessus de la couche liquide (c); ce radeau peut alors se déplacer sous l'effet du vent. Mais ce scénario s'est révélé erroné, notamment parce que les couches de glace constatées sont trop minces.



sont ces plaques de glaces qui, mues par le vent, poussaient les rochers. Les plaques, épaisses de 3 à 6 millimètres, sont bien trop minces pour soulever les cailloux, mais la grande surface qu'elles offrent au vent les soumet à des forces latérales suffisantes pour qu'elles se chevauchent et s'enchevêtrent; cela augmente leur prise au vent, au point qu'elles deviennent en mesure de pousser les cailloux se trouvant sur leur chemin (voir l'encadré page précédente).

Cette explication permet aussi de comprendre pourquoi les mouvements des cailloux semblent synchronisés: les pierres sont poussées par un même ensemble de plaques de glace. Mais les mouvements ne sont pas parfaitement parallèles, car chaque caillou est poussé sans être solide des autres. Lors de certains événements, ce sont plus de 60 pierres qui sont poussées ensemble dans la même direction. Ces mouvements sont rares et brefs, les enregistrements révélant des durées de quelques minutes, une vingtaine tout au plus.

À l'influence directe du vent sur les plaques viennent s'ajouter les mouvements de l'eau du lac dus au vent. Observés à une vitesse comprise entre 60 et 100 centimètres par minute, ces mouvements font passer de l'eau de la partie nord du lac à sa partie sud. Ils facilitent les dérives des plaques et donc le déplacement des pierres. ■

BIBLIOGRAPHIE

R. D. Norris et al., **Sliding rocks on Racetrack Playa, Death Valley National Park: First observation of rocks in motion**, *PLoS One*, vol. 9(8), article e105948, 2014.

G. Kletetschka et al., **Sliding stones of Racetrack Playa, Death Valley, USA: The roles of rock thermal conductivity and fluctuating water levels**, *Geomorphology*, vol. 195, pp. 110-117, 2013.

**DURÉE
LIBRE**

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

L'AUTEUR



HERVÉ LE GUYADER
professeur émérite de biologie
évolutive à Sorbonne
Université, à Paris

LES DYTITIQUES MÂLES NE MANQUENT PAS D'AIR

Pourquoi chez les dytiques – des coléoptères aquatiques –, certaines femelles portent-elles des cannelures sur leurs élytres, tandis que ceux des mâles sont lisses? Une question de survie face à l'assaut tenace des mâles...

S'il vous est arrivé de scruter les profondeurs d'une mare, vous y avez sûrement rencontré des dytiques. Ces coléoptères aquatiques peuplent les eaux douces de tous les continents (sauf l'Antarctique) où, grâce à leurs puissantes mandibules venimeuses, ils constituent des prédateurs redoutables d'insectes, de têtards, d'alevins et de mollusques. La prochaine fois que vous en croirez un, examinez ses élytres: s'ils portent des cannelures ou autres sculptures, il s'agit d'une femelle. Les mâles, eux, ont le dos aussi lisse que celui d'une coccinelle. Ce dimorphisme sexuel de certaines espèces de dytiques est connu depuis longtemps. Charles Darwin le mentionnait déjà en 1871 dans son ouvrage *La Filiation de l'homme et la sélection liée au sexe*. Il pensait, à l'époque, que ces aspérités aidaient le mâle à agripper la femelle lors de l'accouplement.

Toutefois, ces dernières années, un tout autre scénario a émergé. Ce dimorphisme serait le résultat d'un conflit sexuel dont la cause serait purement physiologique. Il se serait en effet construit autour d'une fonction vitale: la respiration.

Comme le démontrent les phylogénies moléculaires – les arbres de parenté fondés sur la comparaison des génomes –, les insectes descendent de crustacés qui ont colonisé le milieu terrestre il y a plusieurs centaines de millions d'années. À l'instar de divers mammifères, certains sont retournés à l'eau, majoritairement douce. Ainsi, aujourd'hui, nombreux sont ceux dont la larve est strictement aquatique (libellules, éphémères, moustiques...), les insectes adultes – ou imagos – étant aériens. Deux familles, cependant, comportent des animaux ayant une vie aquatique en phase tant larvaire qu'imaginaire: les hémiptères (punaises, pucerons, cigales...) avec les



Hervé Le Guyader
a récemment publié:
**L'Aventure de
la biodiversité,**
(Belin, 2018).

EN CHIFFRES

13 000

On connaît plus de 13 000 espèces de coléoptères aquatiques, dont environ 4 200 dytiques.

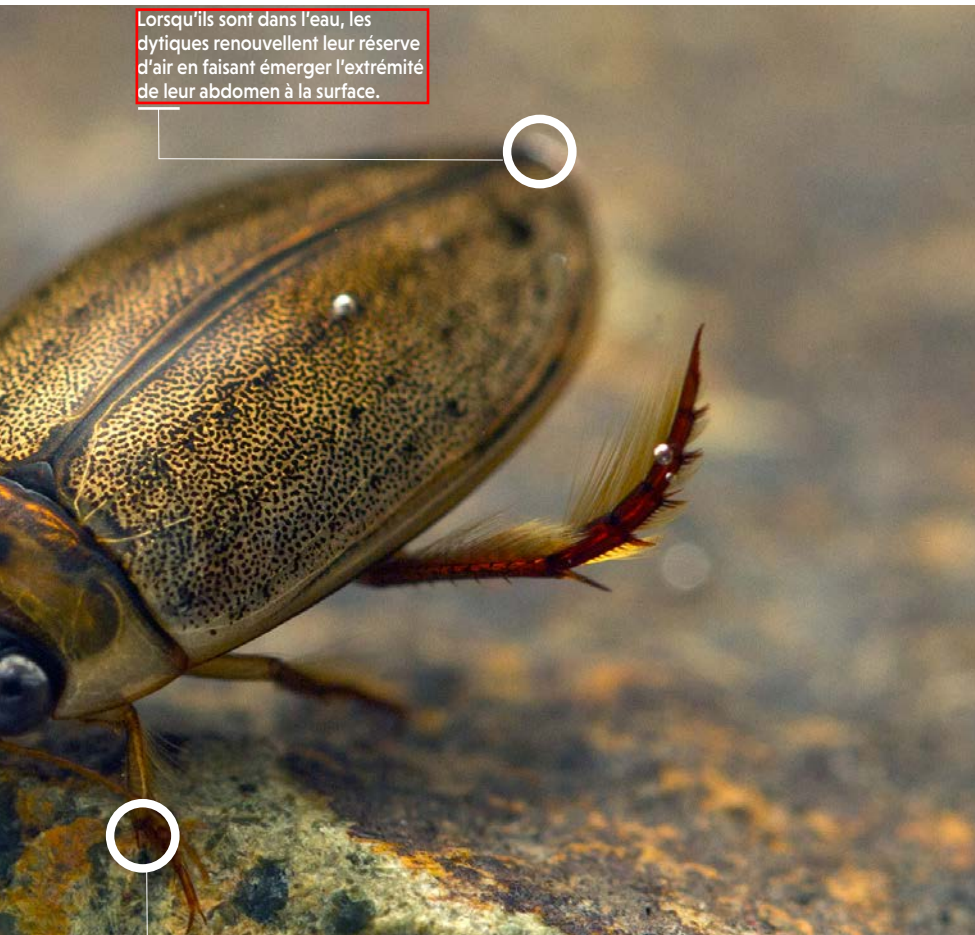
410 MILLIONS

Il y a quelque 410 millions d'années, des crustacés ont colonisé le milieu terrestre et produit par évolution l'ensemble des insectes, d'après la datation de l'origine des récepteurs olfactifs caractéristiques d'animaux aériens. Depuis, les insectes ont conquis tous les milieux terrestres et représentent à eux seuls la moitié des espèces vivantes actuellement décrites.

47 MILLIMÈTRES

Avec ses 47 millimètres de long, *Megadytes ducalis*, qui vit au Brésil, est le plus grand dytique du monde. Le plus grand d'Europe, *Dytiscus latissimus*, mesure 44 millimètres.

Lorsqu'ils sont dans l'eau, les dytiques renouvellent leur réserve d'air en faisant émerger l'extrémité de leur abdomen à la surface.



Ce dytique est un mâle, mais chez cette espèce, rien sur les élytres ne distingue les mâles des femelles. En revanche, les mâles portent des éperons sur la première paire de pattes, contrairement aux femelles...

notonectes ou punaises d'eau, et les coléoptères (hannetons, scarabées, coccinelles...), avec notamment les dytiques.

LA BULLE DU DYTIQUE

S'adapter à la vie aquatique n'a pas dû être simple pour ces insectes (ou plutôt leurs ancêtres), comme pour les cétacés. Comment nager, sentir, respirer? En particulier, certaines innovations, contradictoires, ne se sont imposées qu'au prix d'un compromis évolutif. Par exemple, pour nager en pleine eau, l'animal ne doit pas être trop léger. Or les insectes respirent non par des poumons, mais par des trachées, un réseau de tubes qui s'ouvrent aux stigmates (de petits orifices sur leur

corps) et amènent l'air aux différents organes. Un insecte aérien contient ainsi un important volume de gaz qui le rend trop léger pour plonger. Et un dytique doit donc en contenir bien moins que son cousin aérien, alors qu'il a intérêt à en faire pleine provision pour rester longtemps sous l'eau!

Suffisamment d'air pour respirer, mais pas trop pour plonger, tel est le compromis adopté ici. Pour respirer, le dytique remonte à la surface et laisse émerger l'extrémité de son abdomen. Ce faisant, il renouvelle la réserve d'air au contact des stigmates, emprisonnée entre les élytres et l'abdomen et retenue par des poils. En moyenne, les dytiques de grande taille refont provision d'air toutes les dix minutes – une durée qui varie selon la température de l'eau et la dépense énergétique de l'animal.

UNE COURSE AUX ARMEMENTS ENTRE MÂLE ET FEMELLE

De même, le dimorphisme sexuel (autre que celui des parties génitales) observé chez nombre d'espèces de dytiques serait le fruit d'un compromis évolutif. Chez le mâle, les tarses des deux premières paires de pattes sont munis de ventouses grâce auxquelles il se maintient vigoureusement sur le dos de la femelle pendant l'accouplement. Chez sa partenaire, les élytres et le pronotum (la partie supérieure du premier segment du thorax) présentent parfois de fortes cannelures, des granules ou des sculptures irrégulières prononcées. En 2007, Kelly



Dytique picoté (*Rhantus suturalis*)
Taille: 10,5 à 12,5 mm

Miller, de l'université du Nouveau-Mexique, et Johannes Bergsten, du Muséum d'histoire naturelle de Londres, ont montré chez plusieurs espèces de dytiques du genre *Acilius* que de tels ornements réduisent l'efficacité des ventouses, diminuant la vigueur de l'étreinte du mâle. De plus, en étudiant ces traits dans une lignée, ils ont constaté que ce dimorphisme sexuel semble obéir à une course aux armements, comme ils l'avaient soupçonné depuis plusieurs années chez diverses lignées de dytiques : à une cannelure prononcée répond une augmentation du diamètre des ventouses, et *vice versa*. Après eux, plusieurs autres équipes ont confirmé ce scénario chez d'autres espèces de dytiques.

Un tel phénomène est bien connu en parasitologie : le parasite développe des adaptations qui l'aident à coloniser son hôte et à s'y développer, tandis que ce dernier augmente ses défenses. Mais si une telle compétition est compréhensible dans ce cas, elle paraît incompréhensible dans l'autre : alors qu'un hôte sans parasite vit bien mieux, des dytiques sans reproduction sont voués à l'extinction...

UN ACCOUPLEMENT NÉFASTE

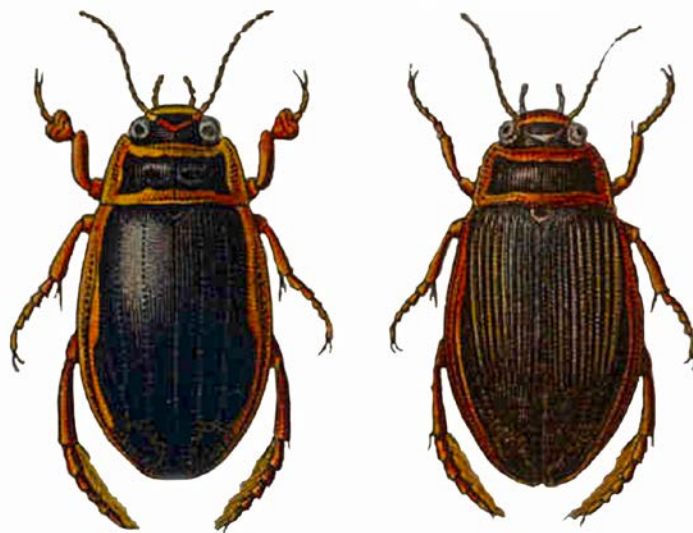
L'intérêt de cette compétition apparaît lorsque l'on examine où les dytiques se reproduisent : non seulement l'accouplement a lieu sous l'eau, mais ventouses mâles et ornements femelles sont fréquents chez les grands dytiques. Or leur accouplement dure particulièrement longtemps et au cours de celui-ci, la femelle tente de déloger le mâle de plus en plus énergiquement. La raison ? La respiration. Le mâle étreint la femelle dorso-ventralement : ainsi, lui peut respirer, elle, non. Le mâle l'empêche d'accéder à la surface. Souvent, à la fin, la femelle semble anéantie et le mâle l'aide à rejoindre la surface.

Ainsi se met en place le conflit sexuel. La femelle développe des défenses qui limitent le nombre d'accouplements, tandis que le mâle cherche à s'accoupler le plus possible. D'où le compromis évolutif : il s'agit bien ici de diminuer le nombre d'accouplements, mais pas de les supprimer, ce qui entraînerait la disparition de la population. On comprend alors qu'un tel équilibre soit évolutivement dynamique. Tantôt un sexe gagne, tantôt l'autre.

Les études de terrain montrent par ailleurs que tout cela peut devenir bien compliqué. Chez certaines espèces, on trouve des femelles dimorphes, certaines au dos lisse, d'autres au dos ornementé,

LES ARMES DES MÂLES ET DES FEMELLES

Les zoologistes ont très vite décrit les originalités des dytiques. Sur cet extrait d'une planche de l'entomologiste autrichien Edmund Reitter publiée en 1908, on distingue bien l'élargissement du tarse de la première paire de pattes chez le mâle (à gauche), absent chez la femelle (à droite). Cette structure porte les ventouses qui servent à l'accrochage du mâle sur le dos de la femelle. On remarque également les stries des élytres de la femelle. À cette époque, les zoologistes pensaient que ces cannelures favorisaient l'accrochage du mâle : ils ne pouvaient imaginer qu'il y eût un conflit sexuel.



respectivement associées à des mâles à ventouses de tailles différentes. Parfois, ce dimorphisme est géographique, aidant vraisemblablement à des spéciations. À elle seule, la course aux armements ne peut expliquer ce dimorphisme. Mais, comme l'ont montré en 2006 Roger Härdling, de l'université de Lund, en Suède, et Johannes Bergsten, alors à l'université d'Umeå, à l'aide d'une modélisation, si les femelles s'accouplent préférentiellement avec les mâles du phénotype le plus rare, un polymorphisme stable s'établit.

Toutefois, ne nous y trompons pas : tout est loin d'être compris. D'autres innovations, résultats d'une sélection sexuelle, ont été détectées. Ainsi, certaines femelles adoptent des conduits génitaux d'une grande complexité autorisant une sélection de sperme, à laquelle les mâles répondent par des polymorphismes de leurs spermatozoïdes. Certains présentent des têtes larges ou filamenteuses, ou encore se groupent en chenilles de un millimètre de longueur. En tout cas, les dytiques constituent un matériel de choix pour étudier une dynamique qui, en associant intimement écologie et évolution, permet de porter un nouveau regard sur le processus de spéciation. ■

BIBLIOGRAPHIE

D. T. Bilton et al., **Water beetles as models in ecology and evolution**, *Annu. Rev. Entomol.*, vol. 64, pp. 359-377, 2019.

D. T. Bilton et G. N. Foster, **Observed shifts in the contact zone between two forms of the diving beetle *Hydroporus memnonius* are consistent with predictions from sexual conflict**, *Peer J.*, vol. 4, article e2089, 2016.

J. Bergsten et K. B. Miller, **Phylogeny of diving beetles reveals a coevolutionary arms race between the sexes**, *Plos One*, vol. 2(6), article e522, 2007.

R. Härdling et J. Bergsten, **Nonrandom mating preserves intrasexual polymorphism and stops population differentiation in sexual conflict**, *Am. Nat.*, vol. 167, pp. 401-409, 2006.

OFFRE D'ABONNEMENT

1 AN

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

3 FORMULES
AU CHOIX

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€

Au lieu de 82,80€

29 %

de réduction *

79€

Au lieu de 114,40€

31 %

de réduction *

99€

Au lieu de 174,40€

43 %

de réduction *

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

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

PAG19STD



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

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)



FORMULE
DÉCOUVERTE

12 n° du magazine papier

59€

Au lieu de 82,80€

P1A39E



FORMULE PAPIER
+ HORS SÉRIE

12 n° du magazine papier
4 Hors-série papier

79€

Au lieu de 114,40€

P1A79E



FORMULE
INTÉGRALE

12 n° du magazine papier
4 Hors-série papier
Accès illimité aux contenus en ligne

99€

Au lieu de 174,40€

P1A99E

2 / J'indique mes coordonnées

☐ M. ☐ Mme

Nom: Prénom:

Adresse:

Code postal Ville:

Téléphone

Email: (indispensable pour la formule intégrale)

.....@.....

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science

☐ OUI ☐ NON

3 / Je choisis mon mode de règlement:

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Carte bancaire

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

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

Signature obligatoire:

Reduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement: 1 an. Délai de livraison: dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/12/2019 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, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

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

L'AUTEUR



HERVÉ THIS
physicochimiste, directeur
du Centre international
de gastronomie moléculaire
AgroParisTech-Inra, à Paris

LES NEUF GOÛTS DU CANARD LAQUÉ

Une équipe de chercheurs chinois a déterminé que neuf composés sont responsables du goût du délice pékinois.

Canard laqué? Ce mets phare de la cuisine chinoise – un canard à la peau luisante et croustillante – existe au moins depuis la dynastie Yuan, au ^{xiv}^e siècle. On part de canards engraisés par gavage pendant deux mois, qui sont égorgés, éviscérés et lavés. On décolle alors leur peau en soufflant de l'air dans un trou fait dans le cou. Puis on les ébouillante, on les enduit de miel et on les sèche pendant 24 heures, avant de les rôtir. Évidemment, cette description est insuffisante: il faudrait ajouter les types de fours utilisés, le combustible et mille autres détails pour la meilleure recette.

«Meilleur» est un terme de contentieux, car est meilleur ce que chacun d'entre nous préfère *hic et nunc*, au gré des humeurs et des appétits. La science chinoise des aliments n'a toutefois pas baissé les bras, et elle vient de déterminer les composés principaux qui sont responsables du goût du canard laqué préparé selon des protocoles précis.

L'intérêt gustatif du plat tient beaucoup à la croustillance, mais les vrais gastronomes ne s'arrêtent pas à une seule composante du goût et ils n'ignorent pas que, avec la saveur, l'odeur rétronasale, perçue par les fosses de l'arrière de la bouche, entre celle-ci et le nez, est essentielle pour l'appréciation du goût. Or, pour les analyses de composés odorants, les techniques de chromatographie en phase gazeuse couplées à la spectrométrie de masse et à l'olfactométrie se sont imposées: avec la chromatographie, on sépare les composés; avec la spectrométrie de masse, on identifie les composés séparés; avec

Le canard laqué,
plat emblématique
de la cuisine chinoise.



l'olfactométrie, on identifie les odeurs de ces divers composés séparés.

Huan Liu et ses collègues de l'Institut de science et technologie des aliments de Pékin sont partis de plusieurs canards achetés aux quatre principaux restaurants pékinois spécialisés en canard laqué. Tous les canards ont été chauffés à 250 °C pendant 60 minutes, sauf le canard des établissements Dadong, qui a été chauffé 20 minutes de plus. Avant les analyses, la peau et les muscles de la poitrine ont été débarrassés du tissu conjonctif et de la graisse visible.

Les chercheurs ont identifié 42 composés odorants: des aldéhydes, des cétones, des alcools, des acides, des phénols, des composés sulfurés et azotés. Des différences sont apparues entre la peau et la chair. Toutefois, ce sont les tests de recombinaison qui ont indiqué les composés principaux. Pour ces tests, on ajoutait des mélanges de composés odorants variés à une matrice inodore, faite de peau de canard laqué des établissements Quanjudé (les initiés reconnaîtront la qualité) qui avait été lavée avec des solvants organiques en vue d'extraire tous les composés odorants, au point que ni les jurés humains ni les analyses n'en détectent trace.

À ce stade, 9 composés restaient importants, contribuant à 99% de l'odeur: cette fois, les composés étaient des aldéhydes, des alcools et des composés sulfurés (voir la fin de la recette). Individuellement,

ces composés ont des odeurs aussi différentes que la pomme de terre cuite ou le champignon, mais les mélanges de composés odorants n'ont pas l'odeur de chaque composé individuel. Et, en l'occurrence, les compositions en composés odorants des canards différaient notablement selon le restaurant de provenance, même pour ces composés principaux. ■

LA RECETTE



- 1 Détacher la graisse d'un magret de canard et la laisser posée sur la chair.
- 2 Saler et poivrer en abondance.
- 3 Faire un mélange d'eau, de sauce soja, de miel et de vinaigre de riz.
- 4 Porter ce mélange à ébullition, puis, à l'aide d'une louche, arroser le magret plusieurs fois pour bien imbiber la peau.
- 5 Poser le magret devant un ventilateur pendant 5 à 24 heures.
- 6 Mettre au four préchauffé à 240 °C et faire rôtir 15 minutes le magret, peau en haut.
- 7 Baisser à 180 °C et poursuivre la cuisson pendant 50 minutes.
- 8 Servir avec des condiments: sauce aux haricots de soja et piment, mélange de sel et de poivre noir, ciboules, crêpes.

Facultatif :

Après la cuisson, vaporiser sur le magret une solution contenant 2-furfurylthiol, diméthyl trisulfure, hexanal, heptanal, octanal, nonanal, méthional, 1-octène-3-ol et (E, E)-2,4-decadienal.

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

**COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION
DÈS MAINTENANT !**



N° 500 (juin 19)
réf. PL500



N° 499 (mai 19)
réf. PL499



N° 498 (avr. 19)
réf. PL498



N° 497 (mar. 19)
réf. PL497



N° 496 (févr. 19)
réf. PL496



N° 495 (jan. 19)
réf. PL495



N° 494 (déc. 18)
réf. PL494



N° 493 (nov. 18)
réf. PL493



N° 492 (oct. 18)
réf. PL492



N° 491 (sept. 18)
réf. PL491



N° 490 (août 18)
réf. PL490



N° 489 (juillet 18)
réf. PL489

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



OUI, je commande des numéros de Pour la Science,
au tarif unitaire de 9,90 €.

1 / JE REPORTE CI-DESSOUS LES RÉFÉRENCES à 5 chiffres
correspondant aux numéros commandés :

1^{re} réf. x 9,90 € = €
2^e réf. x 9,90 € = €
3^e réf. x 9,90 € = €
4^e réf. x 9,90 € = €
5^e réf. x 9,90 € = €
6^e réf. x 9,90 € = €

TOTAL À RÉGLER €

Groupe Pour la Science – Siège social: 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris
Cedex 14 – Sarl au capital de 32000 € – RCS Paris B 311 797 393 – Siret: 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z

Offre valable jusqu'au 31/12/2019 en France Métropolitaine uniquement. Pour l'export, rendez-vous sur notre site internet boutique.pourlascience.fr. Les prix affichés incluent les frais de port et les frais logistiques.
Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société Pour la Science. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. Pour la Science ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme
Nom :
Prénom :
Adresse :

Code postal Ville :
Telephone
J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science
☐ Carte bancaire
N°
Date d'expiration
Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB)
Signature obligatoire :



RETROUVEZ TOUS LES ANCIENS NUMÉROS SUR
BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR

A

PICORER



Retrouvez tous
nos articles sur
www.pourlascience.fr

P.22

1 MILLION

Sur la route, les conducteurs tuent chaque année plus d'un million de personnes dans le monde, selon l'Organisation mondiale de la santé.

P.66

BLINIS

C'est le nom que les Russes donnent aux larges morceaux de glace qui se forment aux pôles, dans l'eau de mer, durant les hivers. À force de chocs répétés, ces blocs prennent une forme quasi circulaire de 30 centimètres à 3 mètres de diamètre, d'où leur nom. En anglais, on les nomme *pancakes* et en français, crêpes de glace...

P.26

« Dans la majorité des cas, une information postée sur Twitter ne se propage pas. À cause du flux qui submerge les utilisateurs, elle s'éteint dès son introduction sur le réseau »

MEHDI MOUSSAÏD

Chercheur en sciences cognitives à l'institut Max-Planck de Berlin

P.58

382

Les astronautes des missions *Apollo* successives ont rapporté sur Terre pas moins de 382 kilogrammes de pierres et de poussières lunaires, dont l'étude est toujours en cours.

P.88

BALLET DE CAILLOUX

Racetrack Playa, dans la Vallée de la Mort, en Californie, est un lac de quelques kilomètres carrés alimenté uniquement par les pluies. Des roches s'y déplacent toutes seules de plusieurs mètres en quelques minutes... et de façon synchronisée. Le pot aux roses n'a été découvert que récemment!

P.92

ACILIUS

Chez ces coléoptères aquatiques, une course à l'armement fait rage entre femelles et mâles. Les premières ont développé des cannelures sur leurs élytres qui empêchent les ventouses des seconds de s'y fixer trop fermement, ce qui limite les risques de noyade de la femelle durant l'accouplement.

P.12

500 000

C'est le nombre d'exemplaires du rétrotransposon L1 dans le génome humain. Cette séquence de plusieurs gènes code toute la machinerie nécessaire pour se dupliquer ailleurs dans le génome. Au fil de l'évolution, ses copies se sont ainsi accumulées jusqu'à occuper 17% du génome humain actuel.



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

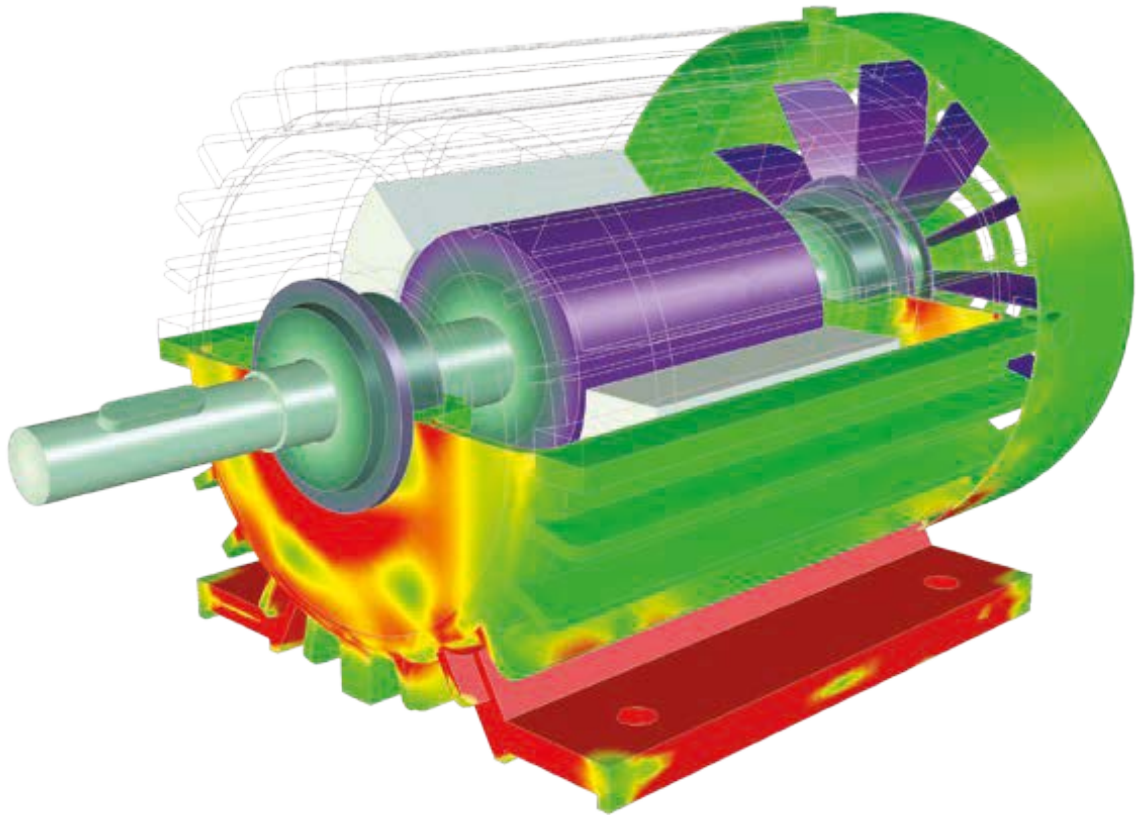
Robert Bosch **Stiftung**

Spektrum
der Wissenschaft

nature

SCIENCE
POUR LA

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